

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2013

Lukáš Rataj

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Návrh pohonu kypovacího stroje

Design of Creping Machine Drive

2013

Lukáš Rataj

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Lukáš Rataj

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T015 Elektronika

Téma:

Návrh pohonu kypovacího stroje
Design of Creping Machine Drive

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technologických požadavků na pohon
2. Návrh měniče kmitočtu a asynchronního motoru pomocí programu Sizer
3. Kontrola navržených komponent pohonu z hlediska tepelných účinků a možnosti přetížení

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího závěrečné práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



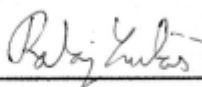
doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě 7. 5. 2013



„Na tomto místě bych chtěl poděkovat hlavně doc. Ing. Ivu Neborákovi, CSc. za konzultace a také Ing. Pavlu Čechovi a Ing. Jiřímu Šromovi za odbornou pomoc a názory při vypracovávání této diplomové práce.“

Abstrakt

Hlavní námětem této diplomové práce, zaměřené na návrh pohonu kypovacího stroje, je uvést základní technologické požadavky kladené na elektrický pohon ve fázi návrhu, zejména určení potřebného výkonu a zatěžovacího cyklu. Bude zobrazen návrh pohonu prostřednictvím softwarového nástroje Sizer firmy Siemens, pomocí kterého budou vybrány jednotlivé komponenty pohonu (usměrňovač a střídač). Nakonec bude provedeno dimenzování asynchronního motoru a měniče kmitočtu jakožto ověření tepelných účinků a možností přetěžování elektrického pohonu. Toto dimenzování programem Sizer bude ověřeno s výsledky ručního výpočtu pomocí vztahů běžně používaných v praxi.

Klíčová slova

elektrický pohon, kypovací stroj, technologické požadavky, Sizer, dimenzování, asynchronní motor, měnič kmitočtu, metoda efektivního momentu

Abstract

The main theme of this diploma thesis, focusing on the Design of Creping Machine Drive indicate the basic technological requirements for electric vehicles at the design stage, in particular, identifying the necessary performance and load cycle. Design of propulsion will be displayed via the software tool Sizer Siemens, with which the individual components of the selected drive (rectifier and inverter). Finally, it will be done the dimensioning of asynchronous motors and frequency converters as verification of thermal effects and the possibility of overloading the electric drive. This dimensioning programme Sizer will be verified with the results of manual calculation using the relationships commonly used in practice.

Key words

electric-powered, creping machine, technological requirements, Sizer, dimensioning, asynchronous motor, frequency inverter, the method of the effective torque

Seznam použitých zkratk, symbolů:

Veličina	Jednotka
A - Práce ohybu	J
A_{230} - Potřebná práce na vykonání 230 ohybů	J
$\cos I$ - Činná složka proudu	A
d - Průměr ocelového drátu	mm
ε_K - Mezní prodloužení materiálu	mm
F - Ohýbací síla	N
f_N - Jmenovitá napájecí frekvence motoru	Hz
h - výška ohybníku	mm
I_1, I_2, I_3, I_4 - Proud v jednotlivých úsecích cyklu	A
I_r, I_s, I_t - Proud jednotlivých fází	A
I_{d^*} - Žádaná hodnota magnetizačního proudu	A
I_{q^*} - Žádaná hodnota momentotvorného proudu	A
$I_{q(akt)}$ - Aktuální hodnota momentotvorného proudu	A
I_{DC} - Proud meziobvodu	A
I_{EF} - Efektivní hodnota proudu v daném cyklu	A
I_{FAV} - Střední hodnota proudu v daném cyklu	A
I_N - Jmenovitý proud motoru	A
J_M - Moment setrvačnosti motoru	kgm ²
J_{PM} - Moment setrvačnosti pracovního mechanismu	kgm ²
l - Vzdálenost podpor	mm
$M_1(t), M_2(t), M_3(t), M_Z(t)$ - Dílčí efektivní momenty v čase	Nm
M_{DOV} - Dovolенý moment motoru	Nm
M_{EF} - Celkový efektivní moment	Nm
M_{EFS} - Celkový efektivní moment určený návrhovým nástrojem Sizer	Nm
M_M - Moment motoru	Nm
M_{MAX} - Maximální moment motoru	Nm
M_N - Jmenovitý moment motoru	Nm
M_O - Ohybový moment	Nm
M_{PM} - Moment pracovního mechanismu	Nm
η_M - Účinnost motoru	-
η_P - Účinnost převodovky	-
P - Potřebný výkon	W
$P(akt)$ - Aktuální výkon	W
p_O - Celkový počet ohybů	-
R_M - Mez pevnosti v tahu ohýbaného materiálu	MPa
$\sin I(akt)$ - Jalová složka proudu	A
t - Doba cyklu	s
t_1 - Doba rozběhu	s
t_2 - Doba běhu	s
t_3 - Doba brzdění	s
t_4 - Doba stání	s
$U_{DC}, U_{DCmin}, U_{DCmax}, U_{DC(akt)}$ - Napětí meziobvodu	V
W_O - Průřez ohýbaného materiálu	mm ²
ω - Úhlová rychlost	rads ²

Seznam obrázků

Kapitola 1

<i>Obr. 1.1 Základní struktura elektrického regulovaného pohonu</i>	1
---	---

Kapitola 2

<i>Obr. 2.1 Pohled na převodová kola</i>	6
<i>Obr. 2.2 Pohled na kypovací kola s ozubením</i>	7
<i>Obr. 2.3 Skládající stroj zpracovávající ohnuté dráty</i>	7
<i>Obr. 2.4 Součást M1</i>	8
<i>Obr. 2.5 Součást M2</i>	9
<i>Obr. 2.6 Součást M3</i>	10
<i>Obr. 2.7 Součást M4</i>	11
<i>Obr. 2.8 Detail drátu pro určení rozměrů</i>	13
<i>Obr. 2.9 Pohon s převodovkou</i>	15
<i>Obr. 2.10 Pohled na převodovku</i>	15
<i>Obr. 2.11 Průběh rychlosti a zrychlení</i>	16

Kapitola 3

<i>Obr. 3.1 Schéma zapojení pohonu kypovacího stroje</i>	18
<i>Obr. 3.2 Řídicí jednotka CU320-2 (s a bez řídicího panelu)</i>	20
<i>Obr. 3.3 Konfigurace řídicí jednotky CU320-2</i>	21
<i>Obr. 3.4 Typická konfigurace pohonu s měničem Sinamics S120</i>	22
<i>Obr. 3.5 Pohled na frekvenční měnič v modulárním provedení</i>	23
<i>Obr. 3.6 Obvodové řešení frekvenčního měniče (vstupní filtr, vstupní tlumivka, usměrňovač, střídač)</i>	23
<i>Obr. 3.7 Možná provedení frekvenčních měničů řady SINAMICS S120 [9]</i>	24
<i>Obr. 3.8 Menu pro výběr a nastavení jednotlivých částí regulovaného pohonu</i>	25
<i>Obr. 3.9 Pohled na Smart Line modul – usměrňovač</i>	26
<i>Obr. 3.10 Schéma zapojení usměrňovače</i>	27
<i>Obr. 3.11 Zde na obrázku jsou uvedeny typický průběh proudu a napětí na vstupu usměrňovače</i>	27
<i>Obr. 3.12 Typické průběhy proudu a napětí na vstupu usměrňovače (různé typy usměrňovačů)</i>	29
<i>Obr. 3.13 Konfigurace Smart Line modulu</i>	30
<i>Obr. 3.14 Hodnoty doporučeného a maximálního výkonu určené programem Sizer</i>	30
<i>Obr. 3.15 Řízení IGBT usměrňovače</i>	31
<i>Obr. 3.16 Vstupní tlumivky</i>	32
<i>Obr. 3.17 Menu pro nastavení mechanického systému a výběr vhodného motoru</i>	33
<i>Obr. 3.18 Popis kypovacího kola</i>	33
<i>Obr. 3.19 Průběh momentu a rychlosti v čase</i>	34
<i>Obr. 3.20 Vypočtená hodnota efektivního momentu bez uvažování J_M pomocí programu Sizer</i>	34
<i>Obr. 3.21 Dovolенý, efektivní a maximální moment motoru 1PH8133-1xFx0-xxx1 určený Sizerem</i>	35
<i>Obr. 3.22 Průběh rychlosti a momentu motoru bez J_M a s J_M určeným programem Sizer</i>	36
<i>Obr. 3.23 Vypočtená hodnota efektivního momentu s uvažováním J_M pomocí programu Sizer</i>	36
<i>Obr. 3.24 Menu pro výběr motorového modulu</i>	37
<i>Obr. 3.25 Pohled na motorový modul - střídač</i>	37
<i>Obr. 3.26 Konfigurace motorového modulu (pro moduly od 45-200 A)</i>	38
<i>Obr. 3.27 Energetické požadavky pro jednotlivé části</i>	39
<i>Obr. 3.28 Motory s rozhraním Drive-CLiQ</i>	40
<i>Obr. 3.29 Snímací modul SMC10</i>	41
<i>Obr. 3.30 Princip Servo řízení</i>	42

Kapitola 4

<i>Obr. 4.1 Průběh dílčích momentů vypočtených programem Sizer</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 4.2 Průběh proudu měniče kmitočtu v dílčích úsecích (rozběh, běh, brzdění a pauza)</i>	<i>49</i>

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Vstupní hodnoty pro Sizer</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 2 Dílčí efektivní momenty vypočtené programem Sizer</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 3 Hodnoty napájecí sítě</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 4 Hodnoty DC/AC měniče</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 5 Hodnoty AC/DC měniče</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 6 Hodnoty podmínek prostředí</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 7 Katalogové údaje usměrňovače</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 8 Parametry DC meziobvodu</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 9 Parametry DC/AC měniče – střídač</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 10 Parametry napájecího kabelu motoru</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 11 Parametry motoru</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 12 Údaje potřebné pro výpočet</i>	<i>45</i>

Obsah

1. Úvod	1
2. Technologické požadavky na elektrický pohon	2
2.1. Požadavky a klasifikace elektrického pohonu	2
2.2. Třídění elektrických pohonů	3
2.3. Názvosloví	5
2.4. Krypovací stroj	6
2.5. Určení momentů setrvačností pracovního mechanismu	8
2.6. Určení potřebného výkonu a momentu krypovacího stroje	12
2.7. Převodovka	15
2.8. Pracovní cyklus krypovacího stroje	16
3. Návrh měniče kmitočtu a asynchronního motoru pomocí programu Sizer.....	17
3.1. Schéma pohonu krypovacího stroje	18
3.2. Popis zapojení elektrického pohonu pro krypovací stroj	19
3.3. Další možné doplňky měniče Sinamics S120	22
3.4. Sizer – nastavení pro danou aplikaci	25
3.5. Usměrňovač – Smart Line modul 6SL3130-6TE23-6AA3	26
3.6. Princip řízení IGBT usměrňovače	31
3.7. Síťová tlumivka – Line Reactor 6SL3000-0CE23-6AA0	32
3.8. Mechanický systém	33
3.9. Motor – asynchronní servomotor 1PH8.....	34
3.10. Střídač – motorový modul 6SL3120-1TE24-5AA3.....	37
3.11. Energetická bilance elektrického pohonu	39
3.12. Encoder – snímací zařízení.....	40
3.13 Princip řízení střídače.....	42
3.14. Shrnutí navržených komponentů programem Sizer	43
4. Kontrola navržených komponent pohonu z hlediska tepelných účinků a možnosti přetížení.....	45
4.1. Kontrola dimenzování asynchronního motoru 1PH8	46
4.2. Kontrola dimenzování měniče kmitočtu (část střídač)	49
5. Závěr	51
6. Literatura	52
7. Seznam příloh	53

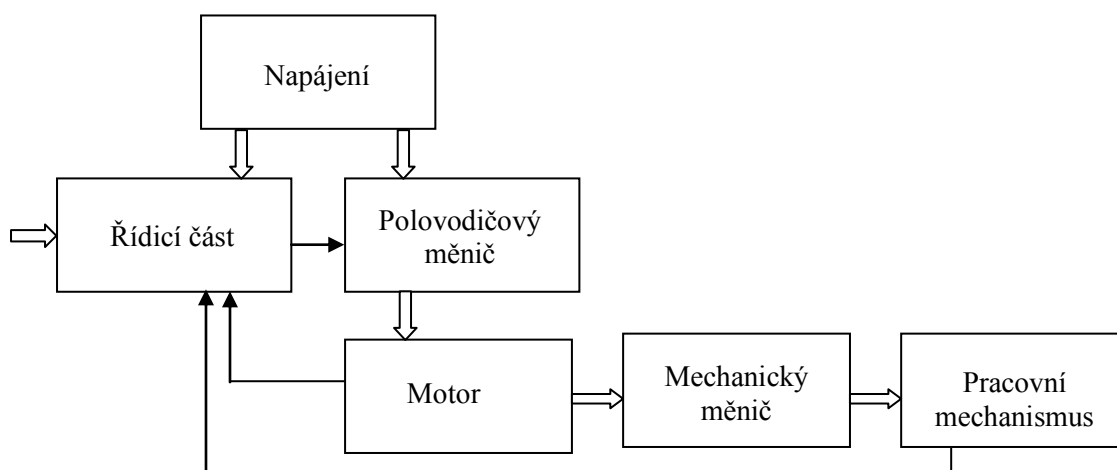
1. Úvod

Požadavek na rozvíjení elektrických pohonů je dán zdokonalováním technologií v několika oblastech, především rozmachem v oblasti mikroprocesorové řídicí techniky, pomoci níž jsou vytvářeny všechny regulační struktury a v oblasti výkonové elektroniky zlepšováním parametrů výkonových polovodičových součástek (IGBT, GTO, MOSFET aj.).

Na začátku byly nejvíce využívány stejnosměrné pohony. Ty jsou napájeny z tyristorových usměrňovačů nebo z pulzních měničů. Mezi nevýhody stejnosměrných pohonů patří větší rozměry, obsahují mechanický komutátor a sběrné ústrojí. Mezi výhody patří především nízká cena, jednoduché zapojení a řízení měniče, motor díky magnetickému toku, který je kolmý na směr proudu vyvíjí max. moment. Tohoto lze u střídavých pohonů dosáhnout pomocí složitých regulačních struktur, avšak i tyto složité struktury v dnešní době, díky rozvíjení mikroprocesorové řídicí techniky jsou zvládnutelné a proto se v mnoha odvětvích přechází ke střídavým regulovaným pohonům s asynchronními a synchronními motory, které mají menší rozměry, hmotnost, vyšší spolehlivost a životnost a možnost konstruovat stroje s velkým výkonem, který je u stejnosměrných pohonů omezen asi na cca 10 MW.

Jeden z hlavních trendů v dnešní době v oblasti regulovaných pohonů je snižování jimi spotřebovávané elektrické energie a zvyšování jejich účinnosti. Proto se ve většině případů využívají frekvenční měniče (firmy ABB, Siemens aj.), neboť u neregulovaných pohonů je velká část energie zmařena. Umožňují zejména regulaci otáček, rozběhy motorů, mají ochranné bezpečnostní funkce a snižují mechanické opotřebení strojů. Lze je tedy najít v různých zařízeních (kompresory, čerpadla atd.).

Elektrický pohon je v podstatě soustava elektromechanických zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie řízenou vstupními řídicími signály, které jsou určené obsluhou nebo řídicím systémem a výstupní veličiny jsou parametry mechanického pohybu. Zpětnovazební signály nám dávají informaci o stavu zařízení, které jsou součástí elektrického pohonu, skládajícího se z motoru, řídicích obvodů polovodičového a mechanického měniče a napájení. [3]



Obr. 1.1 Základní struktura elektrického regulovaného pohonu

2. Technologické požadavky na elektrický pohon

2.1. Požadavky a klasifikace elektrického pohonu

Základní požadavky na moderní elektrický pohon jsou:

- Energetické: elektromechanická přeměna elektrické energie by měla probíhat s co největší účinností. Pohon by neměl svými vlastnostmi nepříznivě ovlivňovat napájecí síť a ekonomiku přenosu elektrické energie.
- Automatizační: lehká nejčastěji spojitá říditelnost parametrů mechanického pohybu s velkým regulačním rozsahem. Řízení pomocí signálů malého výkonu a odolné vůči rušení. Řízení musí být kompatibilní s ostatními systémy. [3]

Při analýze elektrického regulovaného pohonu je třeba vycházet i z dalších z technologických požadavků pracovního mechanismu, kladených na elektrický pohon a také z řady dalších jiných požadavků. Všechny pak můžeme rozdělit na požadavky technické, ekonomické, ekologické a sociální. Požadavky, které se vyskytují nejčastěji, jsou třeba požadavky:

- na trvalý výkon motoru, příp. na výkonovou přetížitelnost motoru;
- na moment záběrný, jmenovitý, příp. maximální nebo na momentovou přetížitelnost;
- na konfiguraci napájecí sítě, tj. napětí, zkratový výkon v místě připojení pohonu, maximální odebíratelný proud při rozběhu;
- účinník a účinnost;
- požadavky na počet rozběhů pohonu za určitý časový interval;
- rychlost a říditelnost pohonu, rozsah postupně nebo plynule nastavitelných rychlostí v jednom nebo obou smyslech otáčení při jednokvadrantovém, dvoukvadrantovém či čtyřkvadrantovém provozu pohonu;
- regulaci elektrických, mechanických či jiných veličin;
- charakter přechodných dějů, na statickou a dynamickou přesnost regulace, na dobu vyrovnaní regulační odchylky způsobené řídicí nebo poruchovou veličinou;
- zrychlení či zpoždění při přechodných jevech vzhledem k namáhání součástí pracovního mechanismu nebo jím zpracovávané látky;
- jištění zařízení a ochranu a bezpečnost obsluhy;
- údržbu, provozní spolehlivost, životnost a diagnostiku;
- rozměry a prostorové uspořádání pohonu;
- ekonomické ukazatele;
- dovolený stupeň ovlivnění okolí [2]

Výčet těchto požadavků dokumentuje rozsáhlost problematiky návrhu elektrického regulovaného pohonu. V současné technické praxi se setkáme s velkým množstvím elektrických pohonů různých druhů. Jestliže chceme určitý elektrický pohon charakterizovat, vycházíme z jeho klasifikace. Ta rozděluje pohony podle těchto kritérií:

- Proudová soustava příváděné energie
- Druh motoru
- Druh akčního členu
- Řiditelnost akčního členu
- Princip řízení motoru
- Druh a úroveň řízení
- A další...

2.2. Třídění elektrických pohonů

Elektrické pohony lze třídit podle různých hledisek:

1. Podle druhu pohybu, kterým se přenáší mechanická energie elektrického pohonu na pracovní mechanismus, rozeznáváme:
 - točivý nebo přímočarý či lineární pohon;
 - spojitý nebo nespojitý pohon;
2. Podle stupně řiditelnosti pohonu rozlišujeme:
 - pohon jednorychlostní, vícerychlostní a s plynule nastavitelnou rychlostí;
 - pohon pro jeden smysl rychlosti, který může pracovat pouze v jednom kvadrantu roviny ω, M (není určen pro brzdění);
 - pohon pro oba smysly rychlosti, který může pracovat v prvním nebo třetím kvadrantu roviny ω, M a opět není určen pro brzdění;
 - pohon pro oba smysly momentu či síly při stejném smyslu rychlosti, umožňující brzdění. Pracovní oblastí je první a druhý, resp. třetí a čtvrtý kvadrant;
 - reverzační pohon pro oba smysly rychlosti a momentu či síly, umožňující reverzaci pohonu za chodu;
 - plně řiditelný pohon s plynule řiditelnou rychlostí ve všech kvadrantech, tj. v režimu motorickém i generátorickém; [2]

3. Podle druhu řízení rozeznáváme pohon:
 - pohon ovládaný ručně nebo automaticky
 - pohon regulovaný samočinně, který si sám mění nebo udržuje své chování podle regulační odchylky nebo podle zpětné vazby od stavových veličin;
4. Podle způsobu řízení
 - obvodově
 - programově
5. Podle druhu hnacího elektromotoru
 - stejnosměrné
 - střídavé
6. Podle spojení elektromotoru s akčním členem
 - s asynchronním motorem a měničem frekvence
 - ventilovým motorem
 - se stejnosměrným motorem a pulsním měničem
 - ventilovou kaskádou
 - Leonardovou skupinou
7. Podle způsobu přenosu mechanické energie na pracovní mechanismus
 - pohon s převodem nebo bez převodu
 - pohon se spojkou nebo bez spojky
8. Podle funkce pohonu
 - hlavní pohon
 - pomocný pohon pohánějící pomocná zařízení hlavního pohonu
 - vedlejší pohon pohánějící vedlejší pracovní mechanismy určené pro správnou funkci hlavního pracovního pohonu
9. Podle počtu motorů
 - jednomotorový
 - vícemotorový [2]

2.3. Názvosloví

Většina názvů a pojmů má v oblasti elektrických regulovaných pohonů přiřazen význam uložený v názvoslovných normách.

Pracovní mechanismus – tím rozumíme mechanické zařízení, v němž se převáděná mechanická energie může měnit na kinetickou nebo potenciální energii.

Pracovní stroj – mechanické zařízení obsahující jedno nebo více pracovních mechanismů.

Hnací moment – tím rozumíme točivý moment hnacího motoru.

Zátěžný moment – moment, kterým působí pracovní mechanismus na hřídeli hnacího motoru.

Pohánění – pracovní režim, při němž to mechanické energie směřuje od hnacího motoru k pracovnímu mechanismu.

Brzdění – pracovní režim, při němž tok mechanické energie směřuje od pracovního mechanismu k hnacímu motoru.

Spouštění – činnost, která je potřebná pro rozběh pohonu.

Rozběh – přechod elektrického pohonu z klidu na jmenovitou popř. jinou rychlost.

Zastavení pohonu – přechod elektrického pohonu z určité rychlosti do klidu.

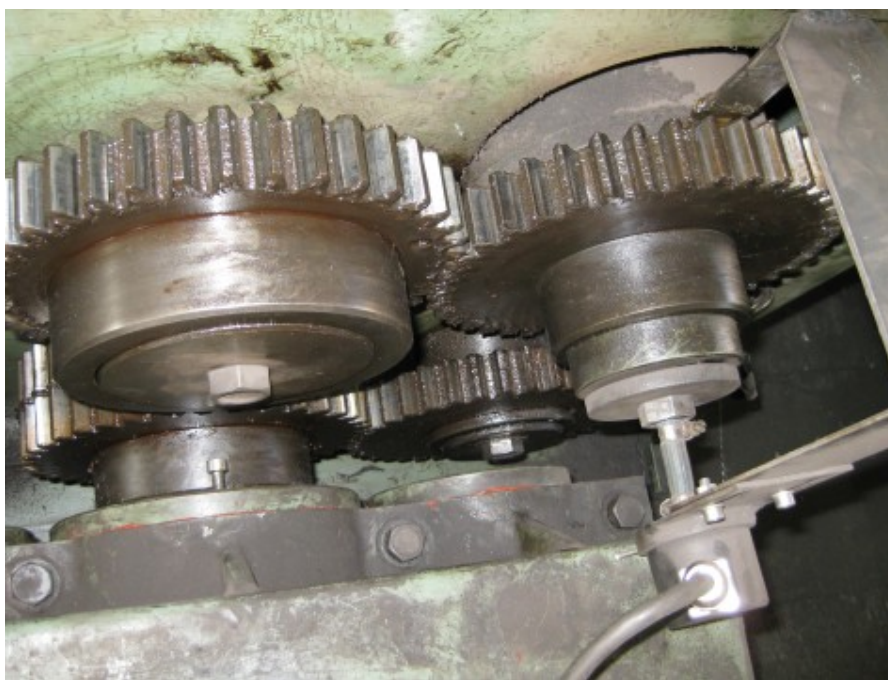
Doběh – zastavení pohonu bez brzdění.

Reverzace – děj, při kterém se mění smysl otáčení motoru.

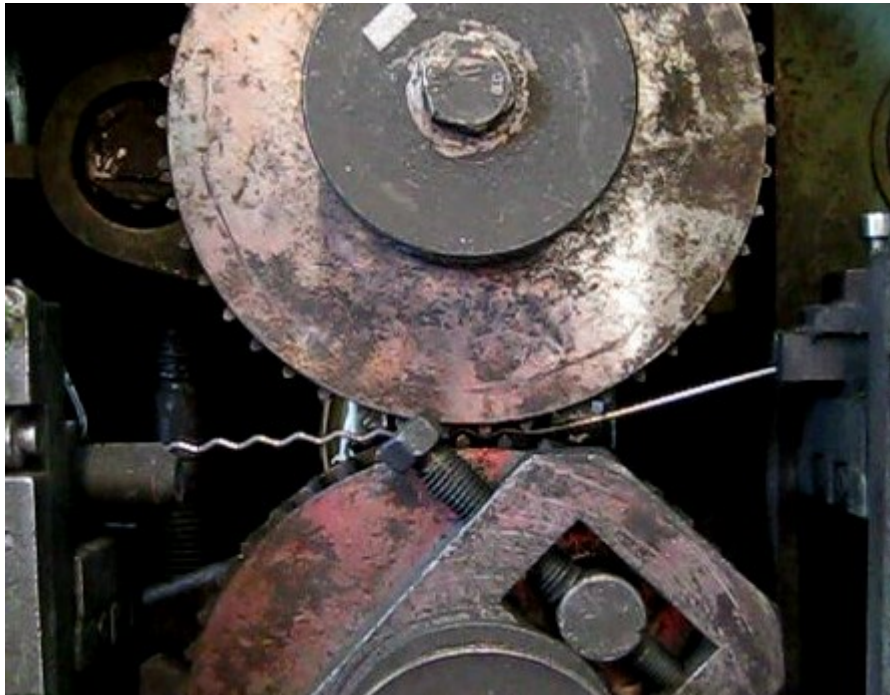
Časová konstanta – charakterizuje přechodné děje mechanické, tepelné a elektromagnetické. [2]

2.4. Kypovací stroj

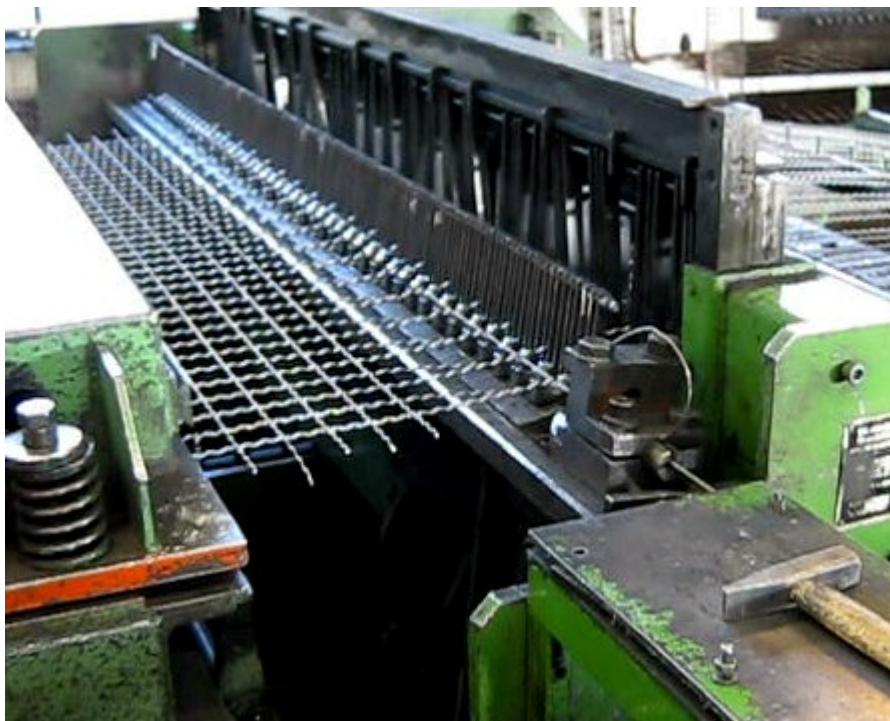
Jde v podstatě o stroj, sloužící k vytváření ohybů pomocí kypovacích kol, která mají po svém obvodu řadu zubů, mezi nimiž prochází ocelový drát, který je tímto ozubením ohýbán a dále pomocí skládacího stroje zpracováván. Na jednotlivých obrázcích je možno vidět pohled na jednotlivé části kypovacího stroje. Těmi jsou 2 kypovací kola a kola s převody s poměrem 1:1. Tento převod 1:1 je proto, aby umožnil pohyb kypovacích kol od sebe a opět k sobě. Bylo důležité zajistit přesné rozměry těchto částí pro určení momentu setrvačnosti a doba vytváření ohybů jednoho drátu délky 1,65 m pro následné určení potřebného výkonu.



Obr. 2.1 Pohled na převodová kola



Obr. 2.2 Pohled na kypovací kola s ozubením

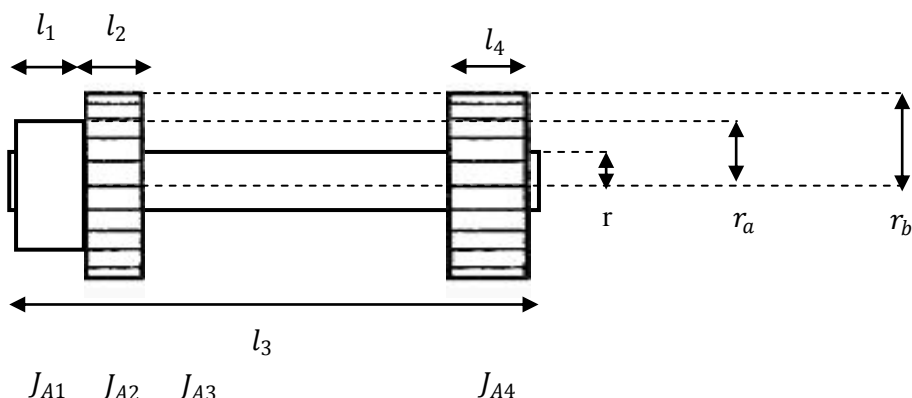


Obr. 2.3 Skládající stroj zpracovávající ohnuté dráty

2.5. Určení momentů setrvačností pracovního mechanismu

Nyní si stanovíme momenty setrvačností jednotlivých částí pracovního mechanismu a následně vypočteme celkový moment setrvačnosti a z něj určíme moment pracovního mechanismu (kypovacího stroje).

Součást M1 [$l_1 = 42 \text{ mm}$, $l_2 = 32 \text{ mm}$, $l_3 = 650 \text{ mm}$, $l_4 = 50 \text{ mm}$, $r = 42,5 \text{ mm}$, $r_a = 92,5 \text{ mm}$, $r_b = 127,5 \text{ mm}$]



Obr. 2.4 Součást M1

$$J_1 = \sum J_{M1} = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_a^2 - r^2) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_b^2 - r^2) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_b^2 - r^2)$$

$$J_{A1} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_a^2 - r^2) = \frac{\pi}{2} \cdot l_1 \cdot \rho \cdot (r_a^4 - r^4) \cdot 10^3$$

$$J_{A1} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,042 \cdot 7,85 \cdot (0,0925^4 - 0,0425^4) \cdot 10^3 = 0,03622 \text{ kgm}^2$$

$$J_{A2} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_b^2 - r^2) = \frac{\pi}{2} \cdot l_2 \cdot \rho \cdot (r_b^4 - r^4) \cdot 10^3$$

$$J_{A2} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,032 \cdot 7,85 \cdot (0,1275^4 - 0,0425^4) \cdot 10^3 = 0,1030 \text{ kgm}^2$$

$$J_{A3} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{\pi}{2} \cdot l_3 \cdot \rho \cdot r^4 \cdot 10^3$$

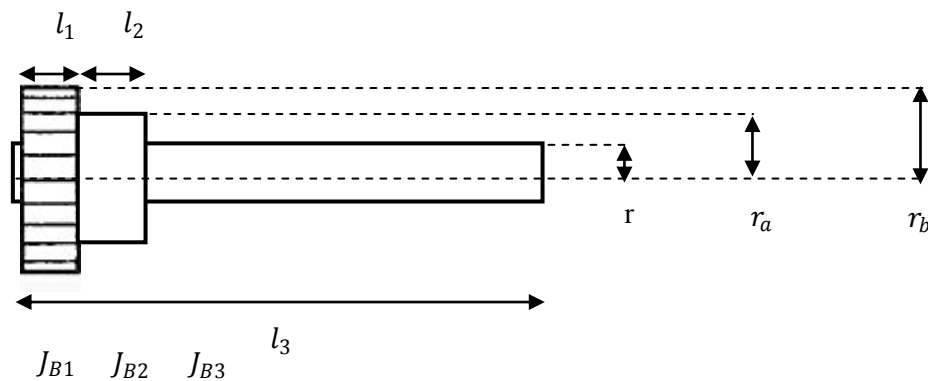
$$J_{A3} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,65 \cdot 7,85 \cdot 0,0425^4 \cdot 10^3 = 0,02615 \text{ kgm}^2$$

$$J_{A4} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_b^2 - r^2) = \frac{\pi}{2} \cdot l_4 \cdot \rho \cdot (r_b^4 - r^4) \cdot 10^3$$

$$J_{A4} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,05 \cdot 7,85 \cdot (0,1275^4 - 0,0425^4) \cdot 10^3 = 0,1609 \text{ kgm}^2$$

$$J_1 = \sum J_{M1} = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} = 0,03622 + 0,1030 + 0,02615 + 0,1609 = \mathbf{0,3263 \text{ kgm}^2} \quad (2.1)$$

Součást M2 [$l_1 = 32 \text{ mm}$, $l_2 = 42 \text{ mm}$, $l_3 = 650 \text{ mm}$, $r = 42,5 \text{ mm}$, $r_a = 52,5 \text{ mm}$, $r_b = 127,5 \text{ mm}$]



Obr. 2.5 Součást M2

$$J_2 = \sum J_{M2} = J_{B1} + J_{B2} + J_{B3} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_a^2 - r^2) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_b^2 - r^2) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$$

$$J_{B1} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_b^2 - r^2) = \frac{\pi}{2} \cdot l_1 \cdot \rho \cdot (r_b^4 - r^4) \cdot 10^3$$

$$J_{B1} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,032 \cdot 7,85 \cdot (0,1275^4 - 0,0425^4) \cdot 10^3 = 0,1030 \text{ kgm}^2$$

$$J_{B2} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_a^2 - r^2) = \frac{\pi}{2} \cdot l_2 \cdot \rho \cdot (r_a^4 - r^4) \cdot 10^3$$

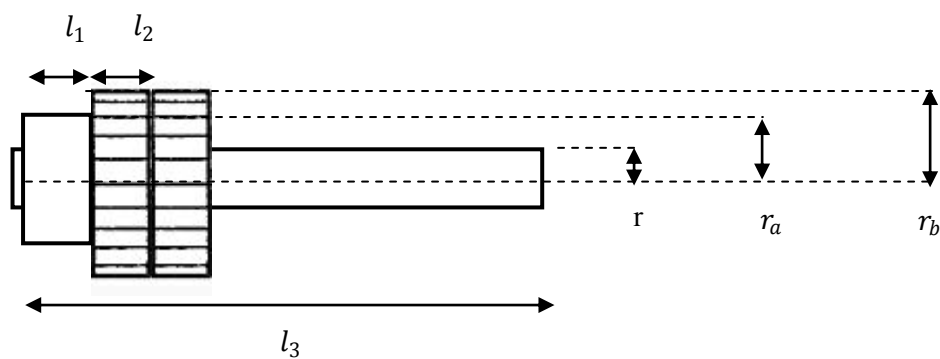
$$J_{B2} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,042 \cdot 7,85 \cdot (0,0525^4 - 0,0425^4) \cdot 10^3 = 0,002240 \text{ kgm}^2$$

$$J_{B3} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{\pi}{2} \cdot l_3 \cdot \rho \cdot r^4 \cdot 10^3$$

$$J_{B3} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,65 \cdot 7,85 \cdot 0,0425^4 \cdot 10^3 = 0,02615 \text{ kgm}^2$$

$$J_2 = \sum J_{M2} = J_{B1} + J_{B2} + J_{B3} = 0,1030 + 0,002240 + 0,02615 = \mathbf{0,1314 \text{ kgm}^2} \quad (2.2)$$

Součást M3 [$l_1 = 42 \text{ mm}$, $l_2 = 32 \text{ mm}$, $l_3 = 650 \text{ mm}$, $r = 42,5 \text{ mm}$, $r_a = 92,5 \text{ mm}$, $r_b = 127,5 \text{ mm}$]



$$J_{C1} \quad 2J_{C2} \quad J_{C3}$$

Obr. 2.6 Součást M3

$$J_3 = \sum J_{M3} = J_{C1} + 2J_{C2} + J_{C3} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_a^2 - r^2) + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_b^2 - r^2) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$$

$$J_{C1} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_a^2 - r^2) = \frac{\pi}{2} \cdot l_1 \cdot \rho \cdot (r_a^4 - r^4) \cdot 10^3$$

$$J_{C1} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,042 \cdot 7,85 \cdot (0,0925^4 - 0,0425^4) \cdot 10^3 = 0,03622 \text{ kgm}^2$$

$$J_{C2} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_b^2 - r^2) = 2 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot l_2 \cdot \rho \cdot (r_b^4 - r^4) \cdot 10^3$$

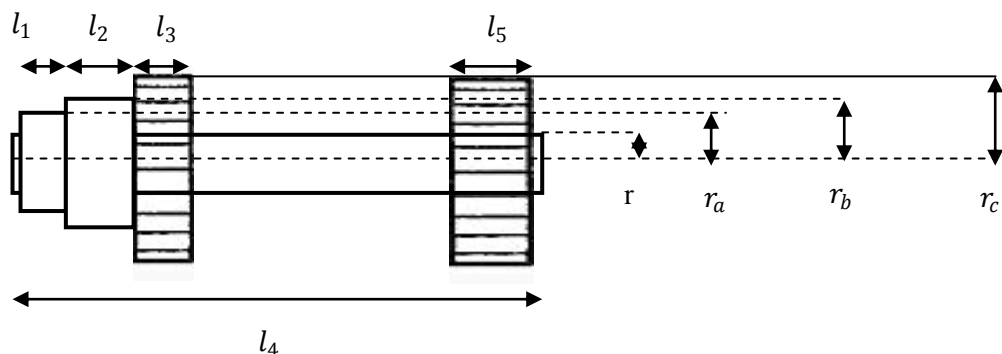
$$J_{C2} = 2 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 0,032 \cdot 7,85 \cdot (0,1275^4 - 0,0425^4) \cdot 10^3 = 0,2060 \text{ kgm}^2$$

$$J_{C3} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{\pi}{2} \cdot l_3 \cdot \rho \cdot r^4 \cdot 10^3$$

$$J_{C3} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,65 \cdot 7,85 \cdot 0,0425^4 \cdot 10^3 = 0,02615 \text{ kgm}^2$$

$$J_3 = \sum J_{M3} = J_{C1} + J_{C2} + J_{C3} = 0,03622 + 0,2060 + 0,02615 = \mathbf{0,2684 \text{ kgm}^2} \quad (2.3)$$

Součást M4 [$l_1 = 25 \text{ mm}$, $l_2 = 42 \text{ mm}$, $l_3 = 32 \text{ mm}$, $l_4 = 650 \text{ mm}$, $l_5 = 50 \text{ mm}$, $r = 42,5 \text{ mm}$, $r_a = 52,5 \text{ mm}$, $r_b = 60 \text{ mm}$, $r_c = 127,5 \text{ mm}$]



Obr. 2.7 Součást M4

$$J_4 = \sum J_{M4} = J_{D1} + J_{D2} + J_{D3} + J_{D4} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_a^2 - r^2) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_b^2 - r^2) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_b^2 - r^2)$$

$$J_{D1} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_a^2 - r^2) = \frac{\pi}{2} \cdot l_1 \cdot \rho \cdot (r_a^4 - r^4) \cdot 10^3$$

$$J_{D1} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,025 \cdot 7,85 \cdot (0,0525^4 - 0,0425^4) \cdot 10^3 = 0,00134 \text{ kgm}^2$$

$$J_{D2} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_b^2 - r^2) = \frac{\pi}{2} \cdot l_2 \cdot \rho \cdot (r_b^4 - r^4) \cdot 10^3$$

$$J_{D2} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,042 \cdot 7,85 \cdot (0,06^4 - 0,0425^4) \cdot 10^3 = 0,00502 \text{ kgm}^2$$

$$J_{D3} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_c^2 - r^2) = \frac{\pi}{2} \cdot l_3 \cdot \rho \cdot (r_c^4 - r^4) \cdot 10^3$$

$$J_{D3} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,032 \cdot 7,85 \cdot (0,1275^4 - 0,0425^4) \cdot 10^3 = 0,10299 \text{ kgm}^2$$

$$J_{D4} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{\pi}{2} \cdot l_4 \cdot \rho \cdot r^4 \cdot 10^3$$

$$J_{D4} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,65 \cdot 7,85 \cdot 0,0425^4 \cdot 10^3 = 0,02615 \text{ kgm}^2$$

$$J_{D5} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_c^2 - r^2) = \frac{\pi}{2} \cdot l_5 \cdot \rho \cdot (r_c^4 - r^4) \cdot 10^3$$

$$J_{D5} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,05 \cdot 7,85 \cdot (0,1275^4 - 0,0425^4) \cdot 10^3 = 0,1609 \text{ kgm}^2$$

$$J_4 = \sum J_{M4} = J_{D1} + J_{D2} + J_{D3} + J_{D4} + J_{D5}$$

$$J_4 = 0,00134 + 0,00502 + 0,10299 + 0,02615 + 0,1609 = \mathbf{0,2964 \text{ kgm}^2} \quad (2.4)$$

Celkový moment setrvačnosti J_{PM} :

$$J_{PM} = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 = 0,3263 + 0,1314 + 0,2684 + 0,2964$$

$$J_{PM} = \mathbf{1,023 \text{ kgm}^2} \quad (2.5)$$

2.6. Určení potřebného výkonu a momentu kryptovacího stroje

Je to jeden z hlavních požadavků pro správný výběr výkonového zatížení motoru. Musí být stanovena potřebná přetvárná neboli ohybová práce kryptovacího stroje, na jejímž základě provedeme přibližný výpočet potřebného mechanického výkonu. Analytický výpočet vychází ze zjednodušených empiricky upravených rovnic, kdy je nejprve proveden výpočet ohýbací síly a následně výpočet přetvárné (ohybové) práce a za jednotku času následně určení potřebného mechanického výkonu kryptovacího stroje.

Při výpočtu předpokládáme ohyb ocelového drátu do tvaru „V“ vycházejícího z výpočtu pro plastický ohyb. V podstatě jde o nosník, zatížený na 2 podporách zatíženého silou F .

$$M_O = \frac{F \cdot l}{4} \quad (2.6)$$

Kde:

M_O – ohybový moment [Nm]

F – ohýbací síla [N]

L – vzdálenost podpor [mm]

Ohybový moment se následně určí dle vztahu:

$$M_O = \frac{F \cdot l}{4} = W_O \cdot R_M \cdot (1,3 + 0,8\varepsilon_K) \rightarrow F \quad (2.7)$$

Kde:

M_O – ohybový moment [Nm]

F – ohýbací síla [N]

L – vzdálenost podpor [mm]

W_O – průřez ohýbaného materiálu [mm²]

R_M – mez pevnosti v tahu ohýbaného materiálu [MPa]

ε_K – mezní prodloužení materiálu [mm]

Jelikož se jedná o ocelový drát, budeme uvažovat kulový průřez:

$$S = W_O = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (2.8)$$

Kde:

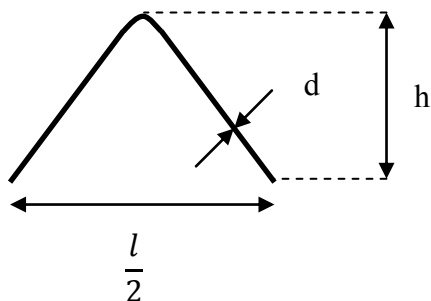
S – průřez ohýbaného materiálu [mm²]

d – průměr ocelového drátu 5 mm

Upravením vztahu pro ohybový moment (viz) získáme vztah pro určení ohýbací síly:

$$M_O = \frac{F \cdot l}{4} = W_O \cdot R_M \cdot (1,3 + 0,8\varepsilon_K) \rightarrow F$$

$$F = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot R_M \cdot (1,3 + 0,8\varepsilon_K)}{8 \cdot l} \quad (2.9)$$



Obr. 2.8 Detail drátu pro určení rozměrů

Kde:

d – průměr ohýbaného materiálu [mm]

h – výška ohybníku [mm]

$\frac{l}{2}$ – vzdálenost podpor [mm]

Určení mezního prodloužení ε_K :

$$\varepsilon_K = \frac{\frac{d}{2}}{0,5d + \frac{d}{2}} = \frac{\frac{5}{2}}{0,5 \cdot 5 + \frac{5}{2}} = 2,5 \text{ mm} \quad (2.10)$$

Určení ohýbací síly F na 1 ohyb:

$$F = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot R_M \cdot (1,3 + 0,8\varepsilon_K)}{8 \cdot l}$$

$$F = \frac{\pi \cdot 5^3 \cdot 370 \cdot (1,3 + 0,8 \cdot 2,5)}{8 \cdot 7,5} = 4117 \text{ N} \quad (2.11)$$

Potřebná práce na 1 ohyb:

$$A = k \cdot F \cdot h \cdot 10^{-3} \quad (2.12)$$

Kde:

k – koeficient zaplnění 0,65 [-]

h – výška ohybníku [mm]

F – síla pro vytvoření 1 ohybu [N]

$$A = k \cdot F \cdot h \cdot 10^{-3} = 0,65 \cdot 4117 \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 18,7 \text{ J} \quad (2.13)$$

Doba ohýbání odpovídá $t_0 = 1,8s$, celkový počet ohybů $p_0 = 230$

Výsledná potřebná přetvarná (ohybová práce) při rychlosti $n_2 = 13 \text{ ot/min}$:

$$A_{230} = p_0 \cdot A \quad (2.14)$$

$$A_{230} = p_0 \cdot A = 230 \cdot 18,7 = 4301 \text{ J} \quad (2.15)$$

Potřebný výkon pro $n_2 = 13 \text{ ot/min}$:

$$P = \frac{A_{230}}{t} = \frac{4301}{1,8} = 2389 \text{ W} \quad (2.16)$$

Potřebný výkon pro $n_3 = 76 \text{ ot/min}$:

$$P = \frac{A_{230}}{t} = \frac{A_{230}}{\frac{t}{\frac{n_3}{n_2}}} = \frac{4301}{\frac{1,8}{76}} = 13965 \text{ W} \quad (2.17)$$

Moment pracovního mechanismu (kryptovacího stroje):

$$M_{PM} = \left(\frac{2 \cdot \pi}{60}\right)^{-1} \cdot \frac{P}{n_3} \quad (2.18)$$

$$M_{PM} = \left(\frac{2 \cdot \pi}{60}\right)^{-1} \cdot \frac{P}{n_3} = \left(\frac{2 \cdot \pi}{60}\right)^{-1} \cdot \frac{13965}{76} = 1756 \text{ Nm} \text{ [Nm, W, rads}^{-1}] \quad (2.19)$$

Porovnání teoreticky vypočtených hodnot s naměřenými hodnotami na původním pohonu:

Otáčky motoru n_2 , změřený příkon $P_1 = 3060 \text{ W}$, účinnost motoru $\eta_M = 85 \%$, účinnost převodovky $\eta_P = 90 \%$

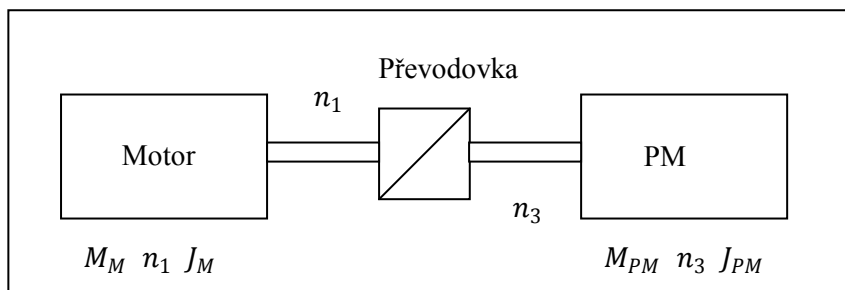
Výpočet výkonu motoru:

$$P_2 = P_1 \cdot \eta_M \cdot \eta_P = 3060 \cdot 0,85 \cdot 0,9 = 2340 \text{ W} \quad (2.20)$$

Respektováním ztrát a vlivu převodovky můžeme při porovnání výkonu motoru stanoveného empirickým výpočtem výkonu a naměřenou hodnotou výkonu usoudit, že rozdíly jsou minimální a můžeme vycházet z empiricky vypočtené hodnoty výkonu motoru. Tyto minimální rozdíly jsou určeny i určitou účinností kryptovacích kol a ozubeným převodovým ústrojím, jejíž hodnota není známá. [5,6,7,8]

2.7. Převodovka

Převodovka v pohonech se používá v elektrických pohonech v případě, je-li požadovaná podstatně nižší rychlost než je jmenovitá rychlost motoru. Použitím převodovky do pomala, je nutné provést redukci momentu pracovního mechanismu a také momentu setrvačnosti části kryptovacího stroje.



Obr. 2.9 Pohon s převodovkou

Čelní převodovka X2FA120/B s převodovým poměrem $i = 16,28$ s účinností 96%. Základní vztahy pro motorickou oblast (směr výkonu od motoru k pracovnímu mechanismu):

$$M = M_{red} = M_{red} \cdot \frac{\omega_{PM}}{\omega} \cdot \eta = \frac{M_{PM}}{i} \cdot \eta$$

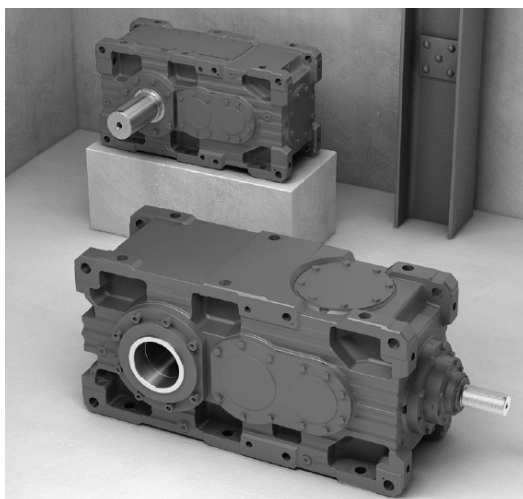
$$J = J_{red} = J_{PM} \frac{\omega_{PM}^2}{\omega^2} = \frac{J_{PM}}{i^2}$$

Redukce Momentu pracovního mechanismu a momentu setrvačnosti na hřídel motoru:

$$M = M_{red} = M_{red} \cdot \frac{\omega_{PM}}{\omega \cdot \eta} = \frac{M_{PM}}{i \cdot \eta} = \frac{1756}{16,28 \cdot 0,96} = 112,36 \text{ Nm} \quad (2.21)$$

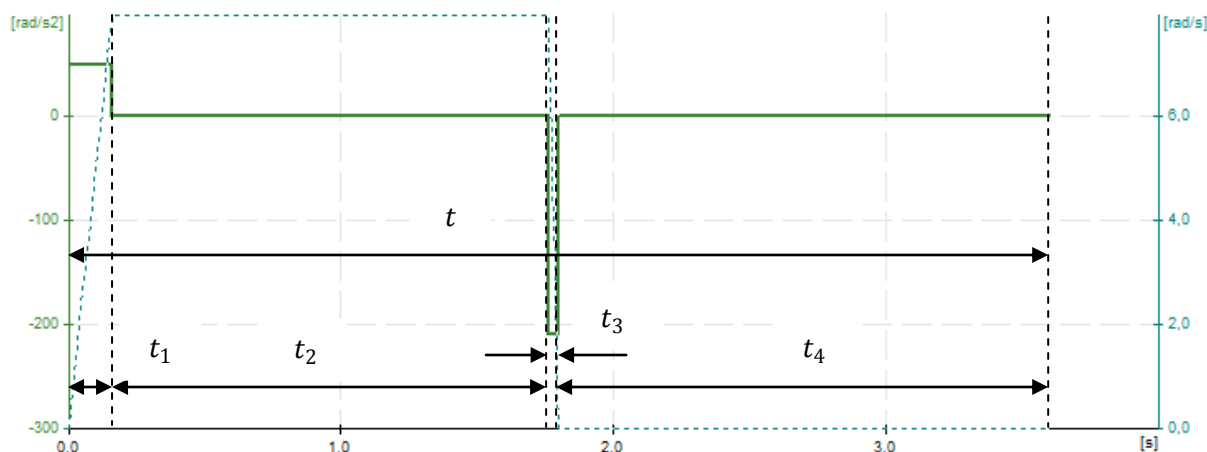
$$J = J_{red} = J_{PM} \frac{\omega_{PM}^2}{\omega^2} = \frac{J_{PM}}{i^2} = \frac{1,023}{16,28^2} = 0,00386 \text{ kgm}^2 \quad (2.22)$$

$$n_1 = n_3 \cdot i = 76 \cdot 16,28 = 1237,3 \text{ ot/min} \quad (2.23)$$



Obr. 2.10 Pohled na převodovku

2.8. Pracovní cyklus kypovacího stroje



Obr. 2.11 Průběh rychlosti a zrychlení

Výpočet jednotlivých dob:

$$M_M - M_{PM} = J_C \cdot \frac{\omega}{t_1} \rightarrow t_1 = J_C \cdot \frac{\omega}{0,7M_M - M_{PM}} = 0,07986 \cdot \frac{129,567}{0,7 \cdot 240 - 112,36} = 186 \text{ ms} \quad (2.24)$$

$$M_M + M_{PM} = J_C \cdot \frac{\omega}{t_3} \rightarrow t_3 = J_C \cdot \frac{\omega}{0,7M_M + M_{PM}} = 0,07986 \cdot \frac{129,567}{0,7 \cdot 240 + 112,36} = 37 \text{ ms} \quad (2.25)$$

$$t_2 = t - (t_1 + t_3 + t_4) = 3,6 - (0,186 + 0,037 + 1,8) = 1,577 \quad (2.26)$$

$$t_4 = 1,8 \text{ s} \quad (2.27)$$

Při dimenzování motoru a měniče musí platit následující podmínky:

$$M_{DOV} \geq M_{PM} \quad (2.28)$$

$$M_{MAX} \geq \frac{M_{PM}}{0,7} \quad (2.29)$$

V případě shody momentů pracovního mechanismu a dovoleného momentu je maximální frekvence dána vztahem:

$$f_{MAX} = 0,7 \cdot 50 \cdot \frac{M_{MAX}}{M_N} \quad (2.30)$$

Při výpočtu dob rozběhu a brzdění je nutno zohlednit maximální namáhání měniče neboť v oblasti odbuzení dochází k poklesu momentu zvratu motoru v kvadratické závislosti na frekvenci a je nutno nastavit bezpečnostní rezervu momentu motoru vůči momentu pracovního mechanismu na 30 % maximálního momentu motoru.

$$M_{DOV} = 0,7 \cdot M_{MAX} \quad (2.31)$$

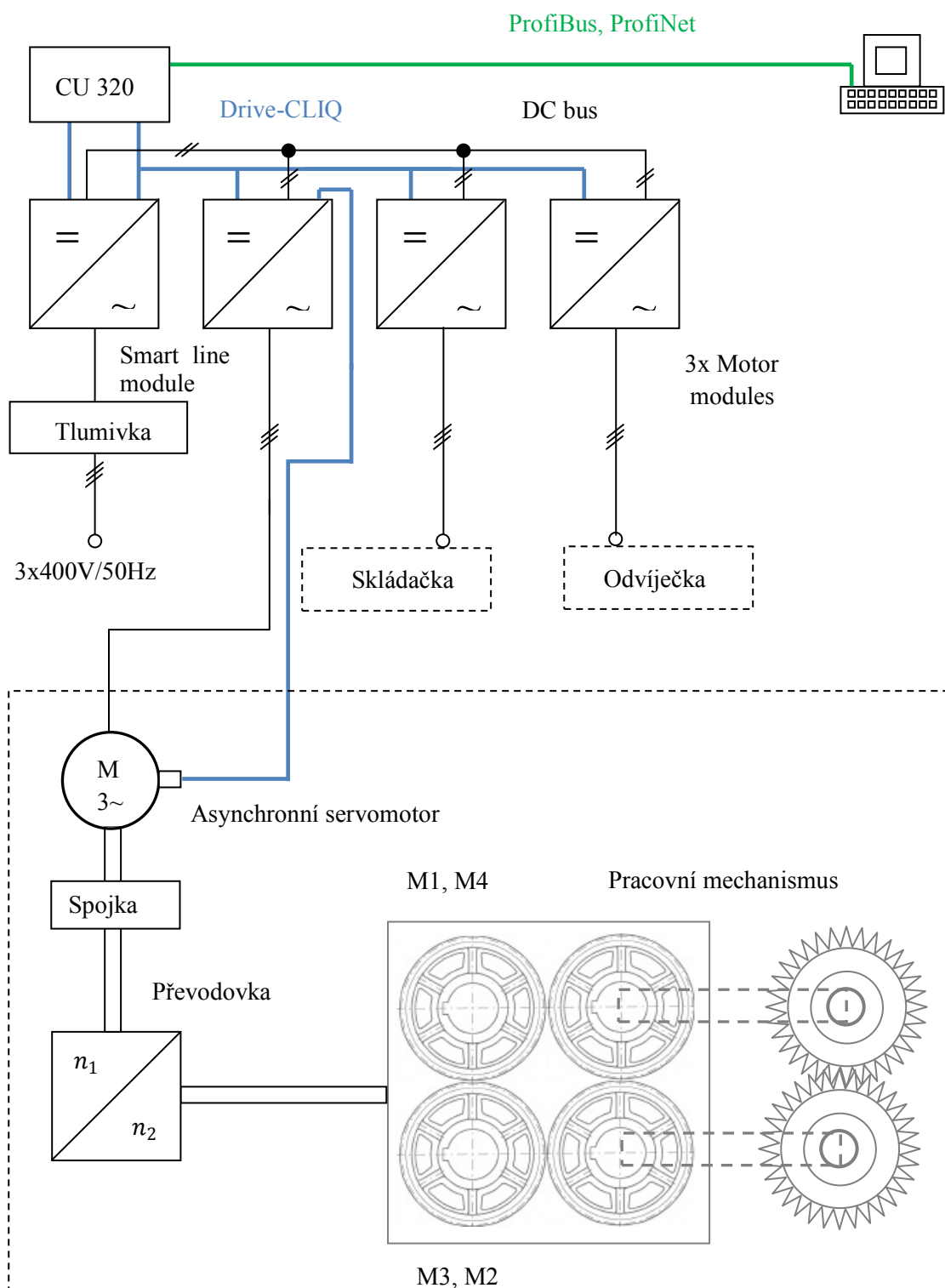
3. Návrh měniče kmitočtu a asynchronního motoru pomocí programu Sizer

Nyní bude proveden výběr komponentů (asynchronního motoru a střídače) pomocí návrhového nástroje Sizer. Bude vycházeno z technologických požadavků, mezi které patří potřebný výkon motoru a z něj vypočítaný moment pracovního mechanismu (2.19), a nakonec jednotlivé doby pro rozběh, běh, brzdění a pauzu (viz pracovní cyklus *Obr. 2.8*) pro které jsou důležitý celkový moment setrvačnosti pracovního mechanismu. Vstupem tedy budou tyto hodnoty (přehled těchto hodnot je uveden v *Tab. 1*). Výstupem programu Sizer bude na základě těchto požadavků vybraný typ motoru, vhodný střídač a průběhy momentů (zejm. efektivní moment a maximální moment potřebný v daném pracovním cyklu).

	Hodnota	Jednotka
Doba cyklu t	3,6	s
Doba rozběhu t_1	0,186	s
Doba běhu t_2	1,577	s
Doba brzdění t_3	0,037	s
Doba stání t_4	1,8	s
Moment setrvačnosti J_{PM}	1,023	kgm ²
Moment M_{PM}	1756	Nm
Rychlost ω	129,567	rads ¹

Tab. 1 Vstupní hodnoty pro Sizer

3.1. Schéma pohonu kryptovacího stroje



Obr. 3.1 Schéma zapojení pohonu kryptovacího stroje

3.2. Popis zapojení elektrického pohonu pro kryptovací stroj

Jedná se o vícemotorovou soustavu, tvořenou vstupní napájecí jednotkou, vstupní tlumivkou, třemi motorovými moduly a řídicí jednotkou. Návrh elektrického pohonu je zaměřen na kryptovací stroj. Ostatní pohony nejsou cílem této diplomové práce. Je zde použitý frekvenční měnič SINAMICS S120 modulárního provedení typu booksize, který se používá pro dynamicky náročné aplikace, které jsou vhodné pro pohony nejrůznějších pracovních strojů až do výkonu 4,5 MW. Jeho výkon je v rozmezí $1,6 \div 107 \text{ kW}$. Je vhodný pro asynchronní, synchronní, momentové a lineární motory.

Komunikace mezi jednotlivými moduly je zajištěná pomocí sběrnice *DRIVE-CLiQ*. Stejnoseměrný meziobvod napájený z napájecího modulu neboli usměrňovače Smart line modulu, může zásobovat více motorových modulů s inventory - střídače. Motorové moduly – střídače s malými vstupními proudy se vyrábějí za účelem úspory a místa také i ve dvojitém provedení tzv. *Double Motor Modules*.

Napájecí moduly mohou být ve trojím provedení

- Basic Line Module – neumožňuje rekuperaci
- Smart Line Module – umožňuje rekuperaci
- Active Line Module – umožňuje rekuperaci a regulaci napětí v meziobvodu

Řídicí jednotka

Řídicí jednotky umožňují řízení elektrického pohonu v režimech U/f, vektorové i servo řízení. Obsahují i bezpečnostní funkce vhodné pro strojní aplikace. Veškerá inteligence frekvenčního měniče je soustředěna do řídicí jednotky a motorový modul je jen výkonový modul řízený z této jednotky přes sběrnici *DRIVE-CLiQ*. Zároveň jsou tyto jednotky také vybaveny rozhraními pro komunikaci s nadřazeným systémem, s nímž mohou komunikovat isochronním, tedy velmi rychlým a především časově přesným protokolem.

Pomocí sítí Profinet nebo Profibus DP lze frekvenční měniče propojovat navzájem a s různými řídicími systémy. Typické spojení je s PLC SMATIC, nejčastěji s technologickými a také se systémy SIMOTION a SINUMERIK. V těchto dvou řídicích systémech může být řídicí jednotka SINAMICS S120 již integrována. Jedná se tedy o SIMOTION D, resp. SINUMERIK solution line. [11]



Obr. 3.2 Řídicí jednotka CU320-2 (s a bez řídicího panelu)

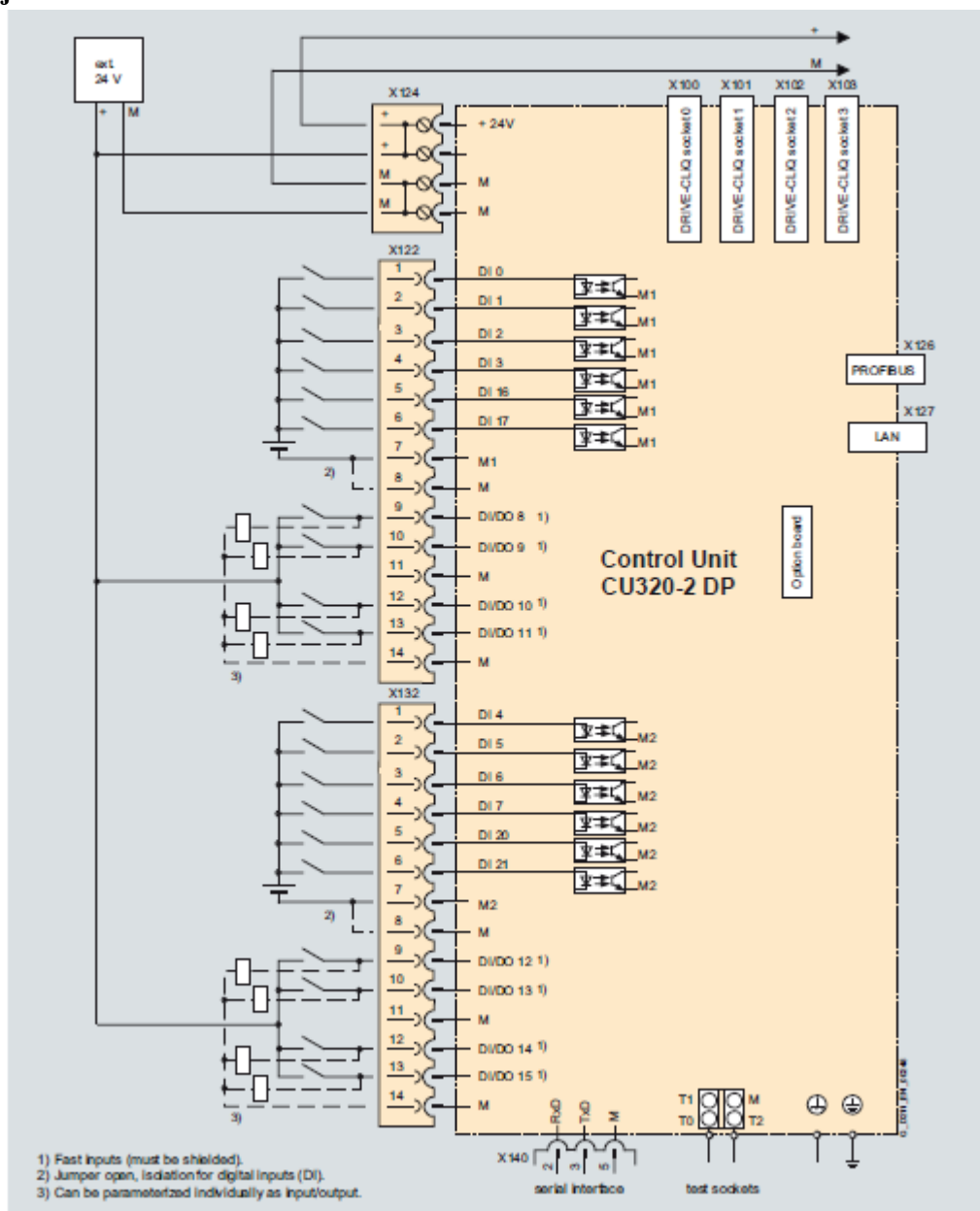
Touto jednotkou jsou řízeny veškeré řídicí funkce jednoho či více motorových modulů. Je sestavena pro vícero motorové pohony. Přes tuto sběrnici Drive-CLiQ jsou připojeny jednotlivé komponenty, např. motorové moduly, Active line modul či smart line modul. Počet připojitelných modulů závisí na požadavku potřebného výkonu vč. typu a dalších funkcí.

Řídicí jednotka CU320-2 a další komponenty jsou zadávány a diagnostikovány nástrojem pro uvedení do Starteru a je nainstalován balíček Sinamics support. Dále vyžaduje použití CompactFlash disku s firmware verze 4.3 a vyšší.

Základní parametry řídicí jednotky CU320-2

- 4x Drive-CLiQ sokety pro komunikaci s jinými moduly (motorový modul, Active nebo Smart line modul, snímačový modul aj.)
- Rozhraní ProfiBus, ProfiNet (použitý ProfiNet)
- 12 nastavitelných digitálních vstupů
- Slot pro paměťovou kartu CompactFlash
- Přípojku pro napájení 24 V DC a spoustu dalších

Řídicí jednotka CU320-2



Obr. 3.3 Konfigurace řídicí jednotky CU320-2

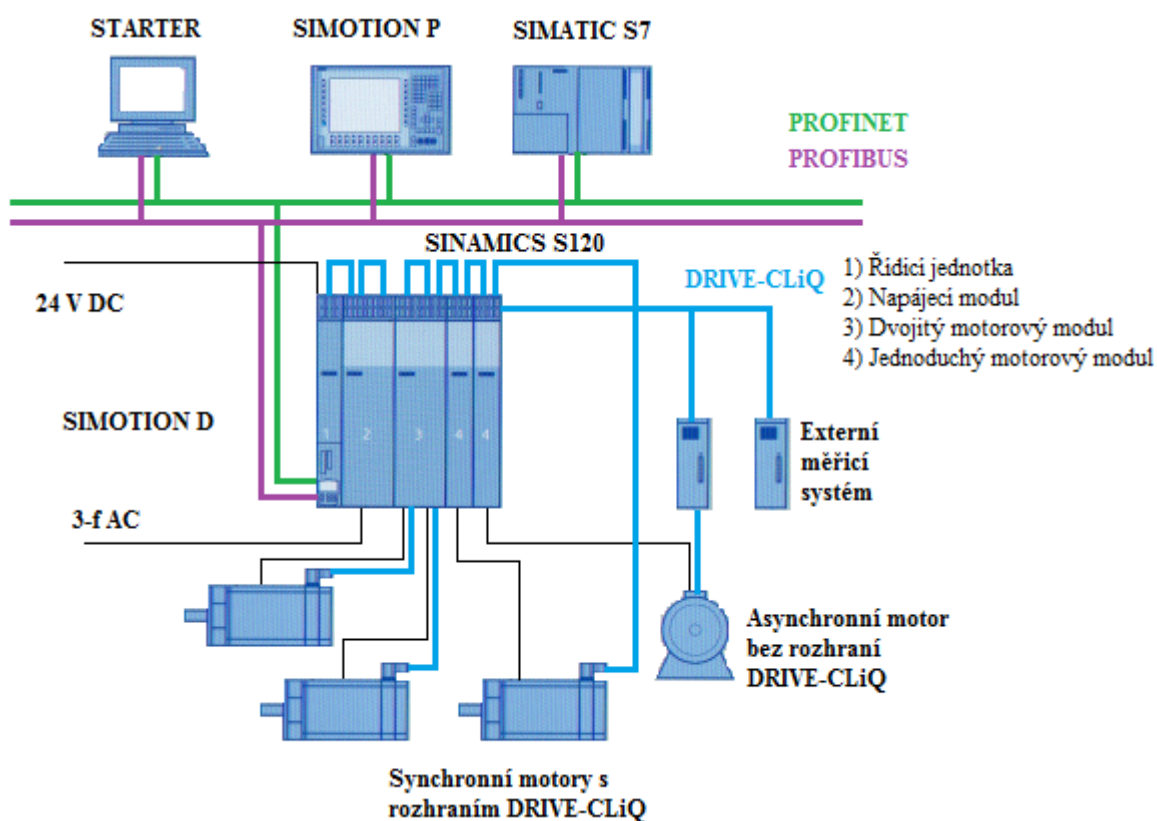
3.3. Další možné doplňky měniče Sinamics S120

Svorkovnicový I/O modul – umožňuje zvětšit počet připojitelných vstupů a výstupů pro zpracování signálů z elektrického pohonu

Snímačové moduly – umožňují připojit snímače rychlosti jako zpětnou vazbu

Komunikační moduly – umožňuje připojit systém k dalším sběrnicím, jakož jsou např. Profinet, Ethernet či Profibus

Drive-CLiQ – je to sběrnice, která slouží k propojení všech těchto doplňků měniče Sinamics



Obr. 3.4 Typická konfigurace pohonu s měničem Sinamics S120

Aplikace jednotky SINAMICS S120

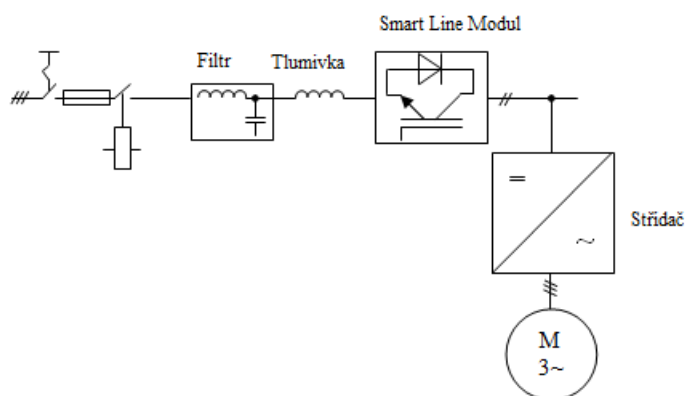
- rychlé balicí stroje
- obráběcí stroje na kov, dřevo, keramiku a kámen
- plastikářské stroje
- textilní stroje
- lisy, děrovačky
- pohony pro válcování aj.

Výhody jednotky SINAMICS S120

- použití v dynamicky náročných jednoosých a víceroosých aplikacích
- velký výkonový rozsah
- jednoduché polohování přímo v měniči
- volné funkční bloky pomocí DCC (Drive Control Chart)
- několik variant chlazení



Obr. 3.5 Pohled na frekvenční měnič v modulárním provedení (řídící jednotka, napájecí jednotka, dvojitý motorový modul, 2 jednomotorové moduly)



Obr. 3.6 Obvodové řešení frekvenčního měniče (vstupní filtr, vstupní tlumivka, usměrňovač, střídač)

Modulární provedení



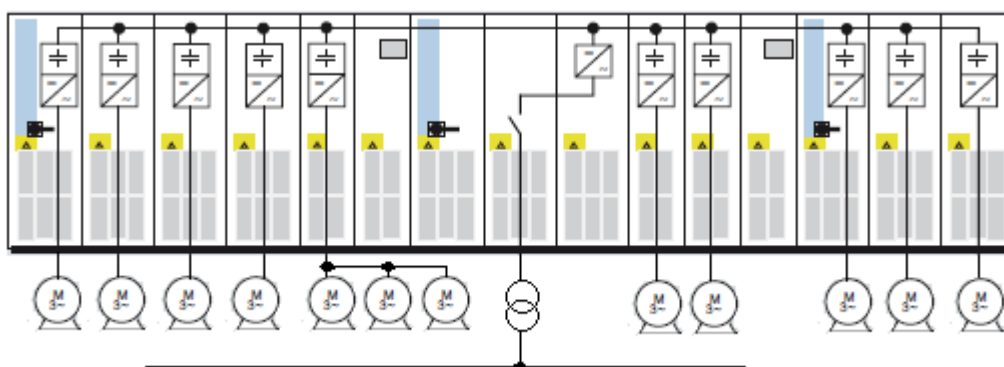
Kompaktní provedení



Vestavné provedení



Skříňové provedení

*Obr. 3.7 Možná provedení frekvenčních měničů řady SINAMICS S120 [9]*

3.4. Sizer – nastavení pro danou aplikaci

Jedná se o software k návrhu elektrických pohonů řady Sinamics a Micromaster. Sizer umožňuje provádět kompletní výpočty pohonů od návrhu pracovního mechanismu a motoru až po navržení vhodného měniče pro danou aplikaci, návrh vhodné kabeláže, či dalších doplňkových komponentů. Výsledkem jsou charakteristiky, technické údaje, montážní a rozměrové výkresy a dále kompletní shrnutí potřebného materiálu a jeho objednávací údaje.

Součástí programu je i průvodce, rozsáhlý help a varování v případě nesprávné konfigurace pohonu. Použití tohoto programu je zcela zdarma, výstup programu je zárukou bezproblémové kompatibility všech částí regulovaného pohonu. Při výběru komponent bude vycházeno z již zmiňovaných vstupních údajů (viz Tab. 1).



Obr. 3.8 Menu pro výběr a nastavení jednotlivých částí regulovaného pohonu

V prvním kroku „Properties“ je nutno provést nastavení sítě (400 V, 3f AC, 50 Hz), kompletní složení měniče jednomotorový či více motorový systém a typ Basic line modul, Smart line modul, či Active line modul a nakonec typovou řadu motoru a v neposlední řadě i typ chlazení a parametry pracovního mechanismu.

V druhém kroku „Motor“ se provádí nastavení parametrů mechanického systému (kryptovacího stroje) a to zejména jeho celkový moment, moment setrvačnosti a doby rozběhu, běhu a brzdění. Dále začlenění převodovky a výběr vhodného motoru.

Dále v kroku „Motor Module“ bude vybrán motorový modul – střídač a to na základě potřebného efektivního proudu, který musí být menší než doporučený proud střídače.

Mezi „Output components“ je možné vybrat du/dt filtr, přepětíovou ochranu, napájecí kabel a typ snímače.

V menu „Line Module“ se vybírá doporučený výkon Smart line modulu a také brzdicí komponenty.

V „System components“ je možno vybrat 24V napěťový zdroj a přídatné doplňky.

3.5. Usměrňovač – Smart Line modul 6SL3130-6TE23-6AA3

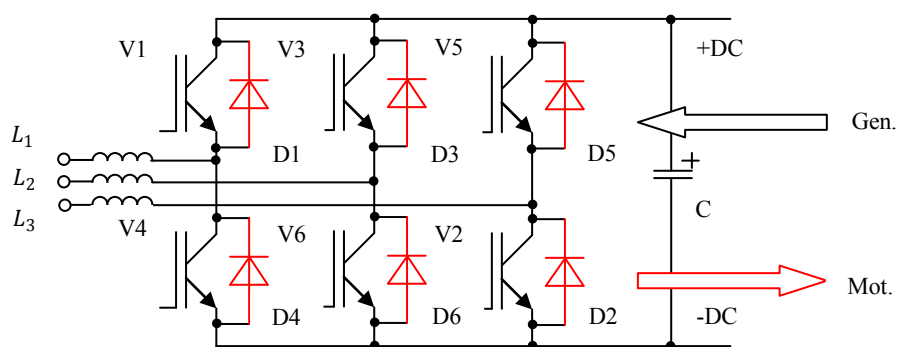
Je to napájecí modul umožňující rekuperaci (vracet energii zpátky do sítě) na rozdíl od Basic line modulu (ten neumožňuje rekuperaci) a ve srovnání s Active line modulem (ten umožňuje rekuperaci a navíc regulaci napětí v meziobvodu), který je tvořen IGBT tranzistory. Je určen pro 4kvadrantový provoz.

Vstup je připojen přímo na síť přes komutační tlumivky. V případě motorického chodu vedou zpětné diody a v případě generátorického chodu vedou IGBT tranzistory s vlastní komutací, jejichž spínání je synchronizováno se sítovou frekvencí (vedení tranzistorů po dobu 120° elektrických) viz *Obr. 3.10*.

Status tohoto modulu je signalizován 2 Led diodami. Výstup IGBT tranzistorového usměrňovače je spojen s kondenzátorem ve stejnosměrném meziobvodu. Tento stejnosměrný meziobvod tvoří napájení pro napěťový střídač označován také jako motorový modul, kterým lze napájet asynchronní motor. Tento usměrňovač zajišťuje usměrnění vstupního proudu a napětí, vyznačuje se odběrem nesinusového proudu. Zároveň musí umožňovat průchod energie oběma směry. Dále se vyznačuje nepříznivými vlivy na napájecí síť zejména díky 5. A 7. harmonické, které způsobují celkové harmonické zkreslení proudu až 40 %. Vyžaduje proto nutnost použití vstupní tlumivky s napětím $u_K = 4 \%$ s ohledem na proudovou symetrii.



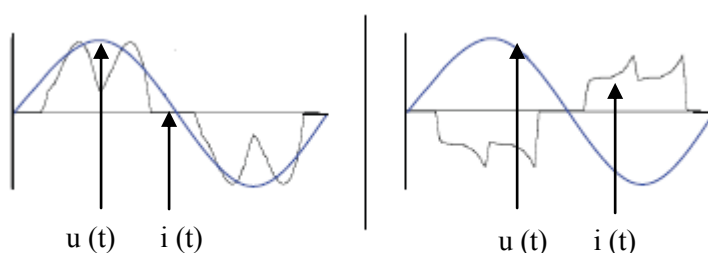
Obr. 3.9 Pohled na Smart Line modul – usměrňovač



Obr. 3.10 Schéma zapojení usměrňovače

Motorický režim (vedou zpětné diody)

Generátorický režim (vedou tranzistory)



Obr. 3.11 Zde na obrázku jsou uvedeny typický průběh proudu a napětí na vstupu usměrňovače

IGBT tranzistory při generátorickém režimu vypínají cca 120° (elekt.) nezávisle na směru toku proudu, resp. energie. Proto tok tohoto proudu resp. energie ze zdroje do meziobvodu nebo naopak je možný kdykoliv. Směr toku aktuálního proudu resp. energie je určen pouze napěťovými poměry mezi napájecí sítí a meziobvodem. Je-li v ustáleném stavu při motorickém režimu napětí DC meziobvodu vždy menší než je napájecí napětí, tak proud teče ze sítě do meziobvodu přes diody. Je-li v ustáleném stavu při generátorickém režimu napětí DC meziobvodu vždy větší než je napájecí napětí, tak proud teče z meziobvodu do napájecí sítě přes IGBT tranzistory.

Tento princip regulace má tu výhodu, že Smart napájení může reagovat poměrně rychle na změny zatížení a může také kdykoliv změnit směr toku proudu resp. energie.

Nicméně popis tohoto principu řízení vytváří kapacitní jalový proud při chodu naprázdno, který teče na straně sítě a nemůže být opomenut. Příčinou je sinusové napětí na straně napájecí sítě a téměř dokonale vyhlazené stejnosměrné napětí v meziobvodu během chodu naprázdno. Proto bezprostředně po sepnutí IGBT tranzistorů teče krátkodobý proud z meziobvodu do napájecí sítě, protože v této době je napájecí napětí o něco nižší, než napětí meziobvodu.

V případě, že napájecí napětí dosahuje maximální hodnoty, jsou poměry napětí opačné a směr toku proudu je také opačný. Kapacitní jalový proud na straně sítě se snižuje se zvyšujícím se zatížením na Smart napájení dokud nezanikne a to při dosažení jmenovitého zatížení.

Rozsah kapacitního jalového proudu bez zátěže je závislý na kapacitě kondenzátoru v meziobvodu připojeného ke Smart modulu. Při maximální přípustné kapacitě kondenzátoru v meziobvodu připojeného ke střídači, jalový proud naprázdno dosáhne velikosti cca 15 % až 20 % jmenovitého proudu ze Smart modulu.

Jalový proud naprázdno může, v zásadě být předešel tím, že blokuje generátorický režim přes příslušný parametr firmware.

V motorickém režimu napětí meziobvodu klesne o něco větší hodnotu než u Basic modulu, protože úbytek napětí na 4 % reaktoru je vyšší než u 2 % reaktoru na Basic modulu. Při částečném zatížení motoru v provozu platí:

$$V_{DC-LINK} = 1,32 \cdot U_{sítě} \quad (3.1)$$

Při plném zatížení platí:

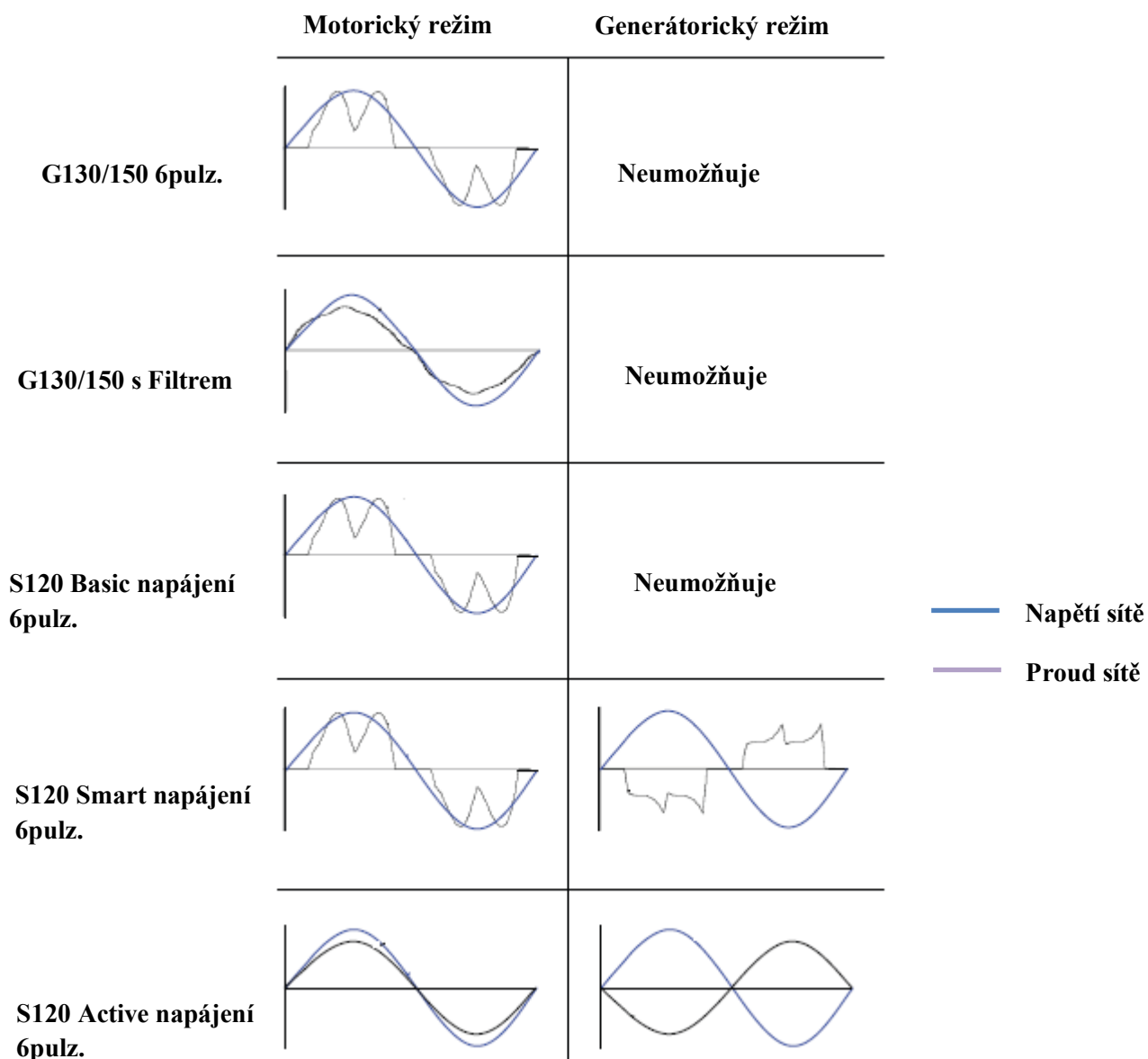
$$V_{DC-LINK} = 1,30 \cdot U_{sítě} \quad (3.2)$$

Napětí meziobvodu je vyšší v generátorickém režimu než v motorovém režimu, neboť směr toku proudu je opačný a tím i úbytek napětí na 4 % reaktoru je větší. Při částečném zatížení v generátorickém režimu platí:

$$V_{DC-LINK} = 1,38 \cdot U_{sítě} \quad (3.3)$$

Při plném zatížení platí:

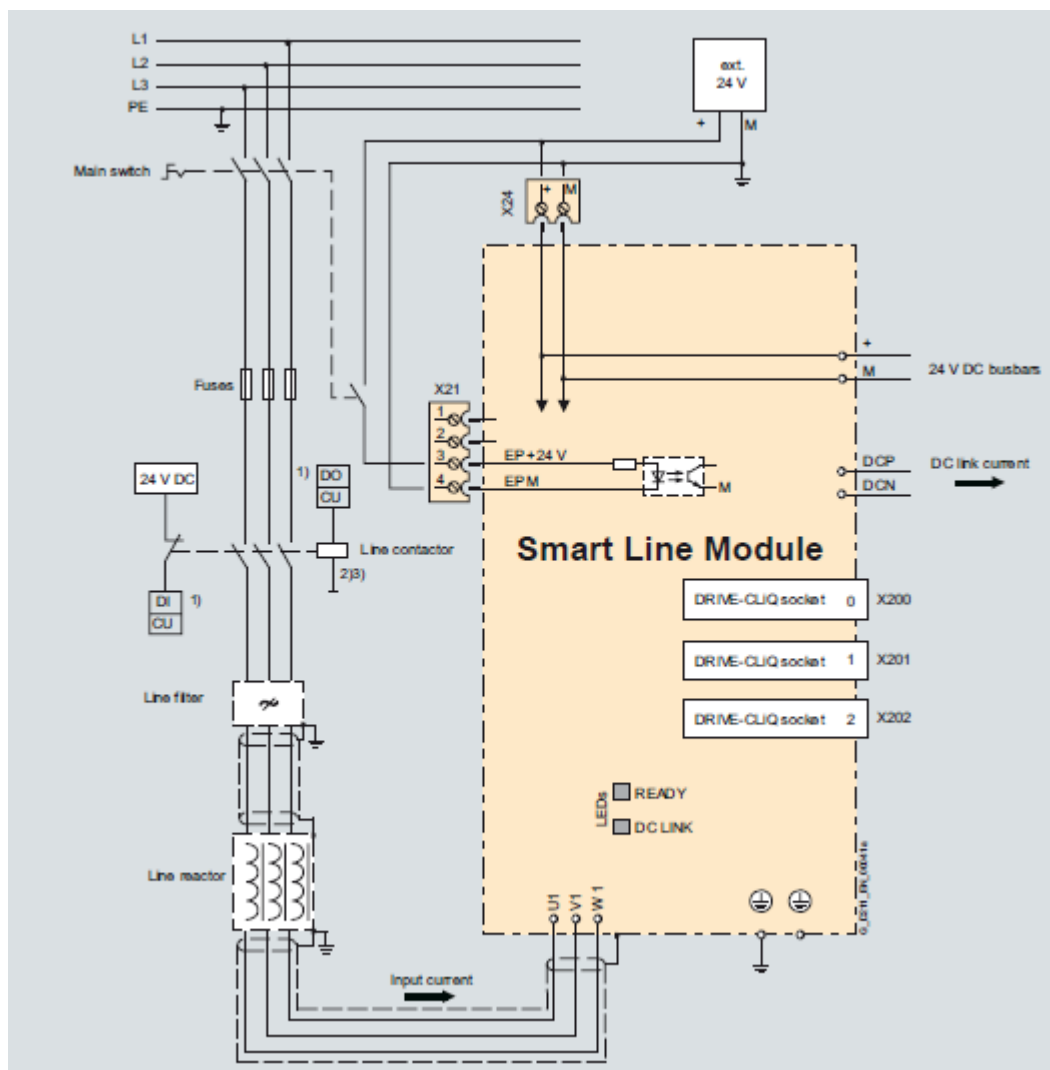
$$V_{DC-LINK} = 1,40 \cdot U_{sítě} \quad (3.4)$$



Obr. 3.12 Typické průběhy proudu a napětí na vstupu usměrňovače (různé typy usměrňovačů)

Smart Line modul má následující připojení a rozhraní jako standard:

- Výkonové připojení přes screw-typ terminál
- Připojení pro 24V DC
- 1 DC link
- 2 digitální vstupy a 1 digitální výstup
- 3x Drive-CLiQ soket

Smart Line modul

Obr. 3.13 Konfigurace Smart Line modulu

- 1) Digitální vstup (DI) nebo výstup (DO) řízen řídicí jednotkou
- 2) Žádné dodatečné proudové zatížení
- 3) Zatížitelnost digitálního výstupu musí být dodržena

Motor	P/P motor	P required	n/n-rated	P-DC-link	P-DC-link max
1PH8133-1DF10-1QA1	-	7,05 kW	-	8,73 kW	26,85 kW

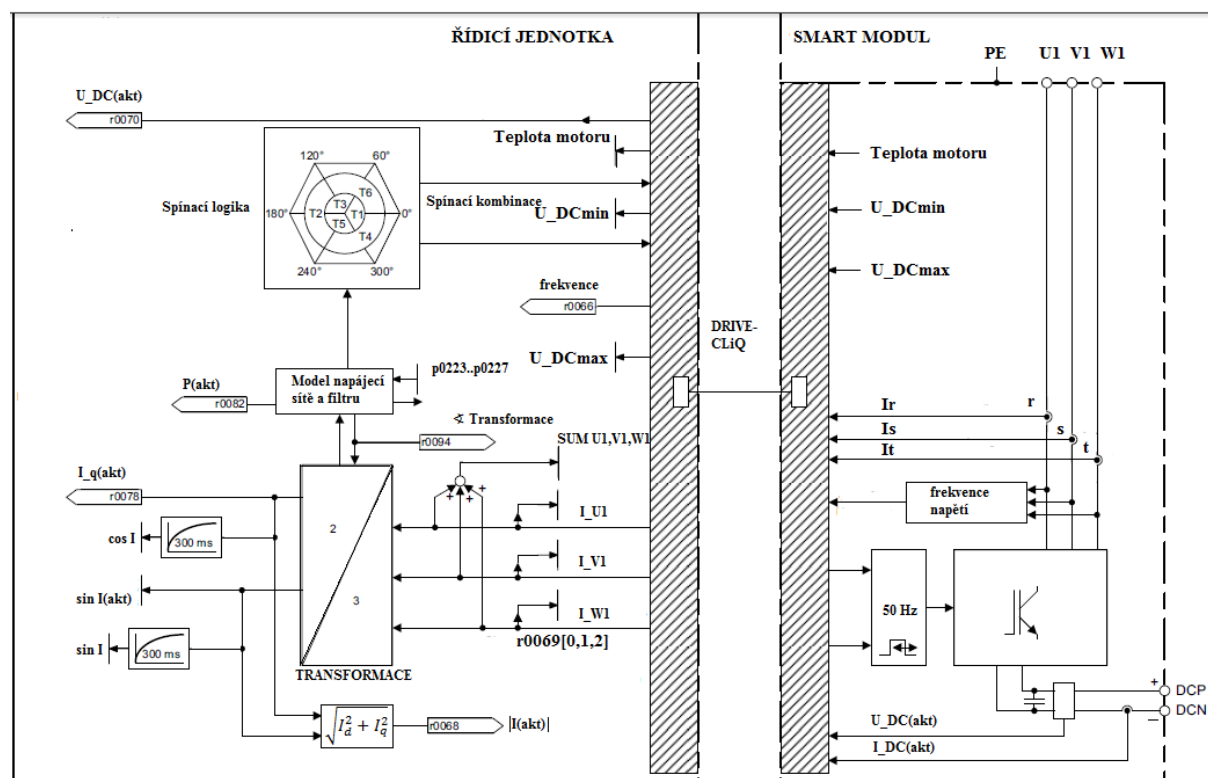
Obr. 3.14 Hodnoty doporučeného a maximálního výkonu určené programem Sizer

Výkon jednotky: 36 kW

Max. proud meziobvodu: 117 A

Max. vstupní proud: 107 A

3.6. Princip řízení IGBT usměrňovače



Obr. 3.15 Řízení IGBT usměrňovače

Zde na Obr. 3.15 můžete vidět princip spínání tranzistorů pomocí synchronizace se síťovým kmitočtem. Nejprve jsou snímány proudy v jednotlivých fázích. To vše je prováděno ve Smart modulu, ve kterém je také snímána teplota motoru a napětí meziobvodu. Do řídicí jednotky CU320 jsou tyto informace přeneseny přes rozhraní Drive-CLiQ. V této řídicí jednotce jsou jednotlivé fázové proudy přetransformovány do dvouosého systému a vstupují do modelu napájecí sítě a filtru. Výsledkem je aktuální úhel, vstupující do spínací logiky, která vygeneruje spínací časy a spíná příslušné tranzistory. V modelu napájecí sítě a filtru je výstupem kalkulace tohoto napětí, určující možné podpětí či přepětí sítě komparováním jmenovitého napětí s aktuální hodnotou napětí. Totéž se provádí s frekvencí sítě a s napětím meziobvodu.

3.7. Síťová tlumivka – Line Reactor 6SL3000-0CE23-6AA0

Smart Line moduly – usměrňovače nemůžou být provozovány bez vstupních tlumivek. Její použití je vhodné z těchto několika důvodů a to vyhlazení vstupního proudu k měniči a tím i snížení počtu harmonických, ochrana měniče před případným přetížením a v neposlední řadě snížení napětí v meziobvodu a tím ke snížení namáhání kondenzátorové baterie.



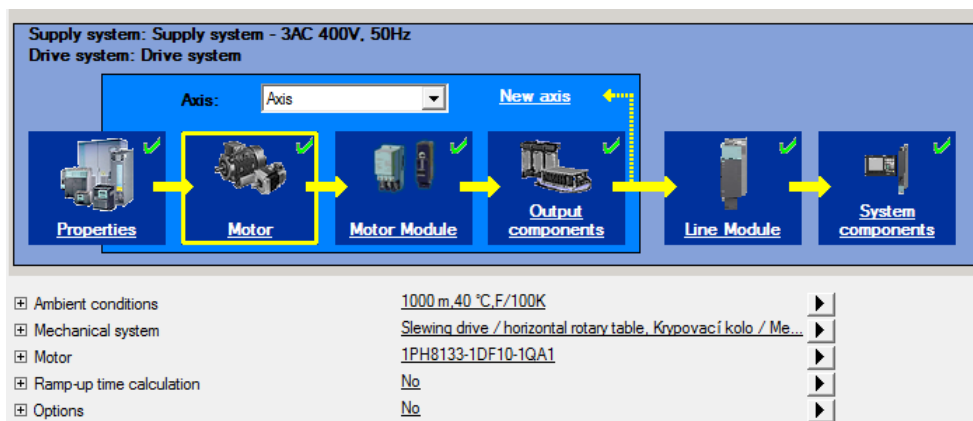
Obr. 3.16 Vstupní tlumivky

Parametry:

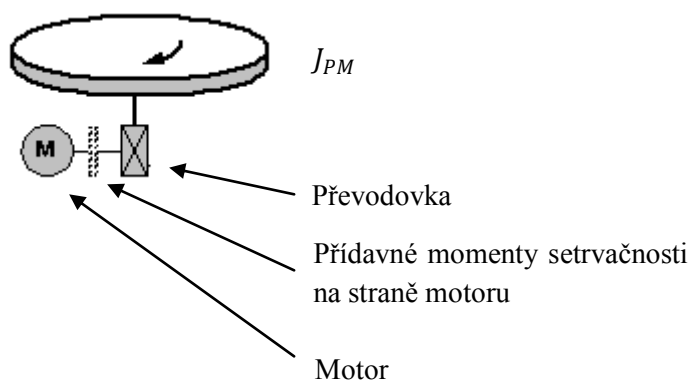
- Proud 69 A
- Výkonová ztráta 170 W
- Doporučený výkon Smart line modulu 36 kW

3.8. Mechanický systém

Jelikož jde o kryptovací kola, lze považovat celý mechanický systém za rotační systém (viz. Obr. 3.18). V nastavení tohoto mechanického systému zadáváme vstupní data (doba rozběhu, běhu, brzdění, pauzy, moment pracovního mechanismu, moment setrvačnosti). Na základě těchto dat vybere program Sizer vhodující motor pro zadaný pracovní cyklus (viz Obr. 2.8).



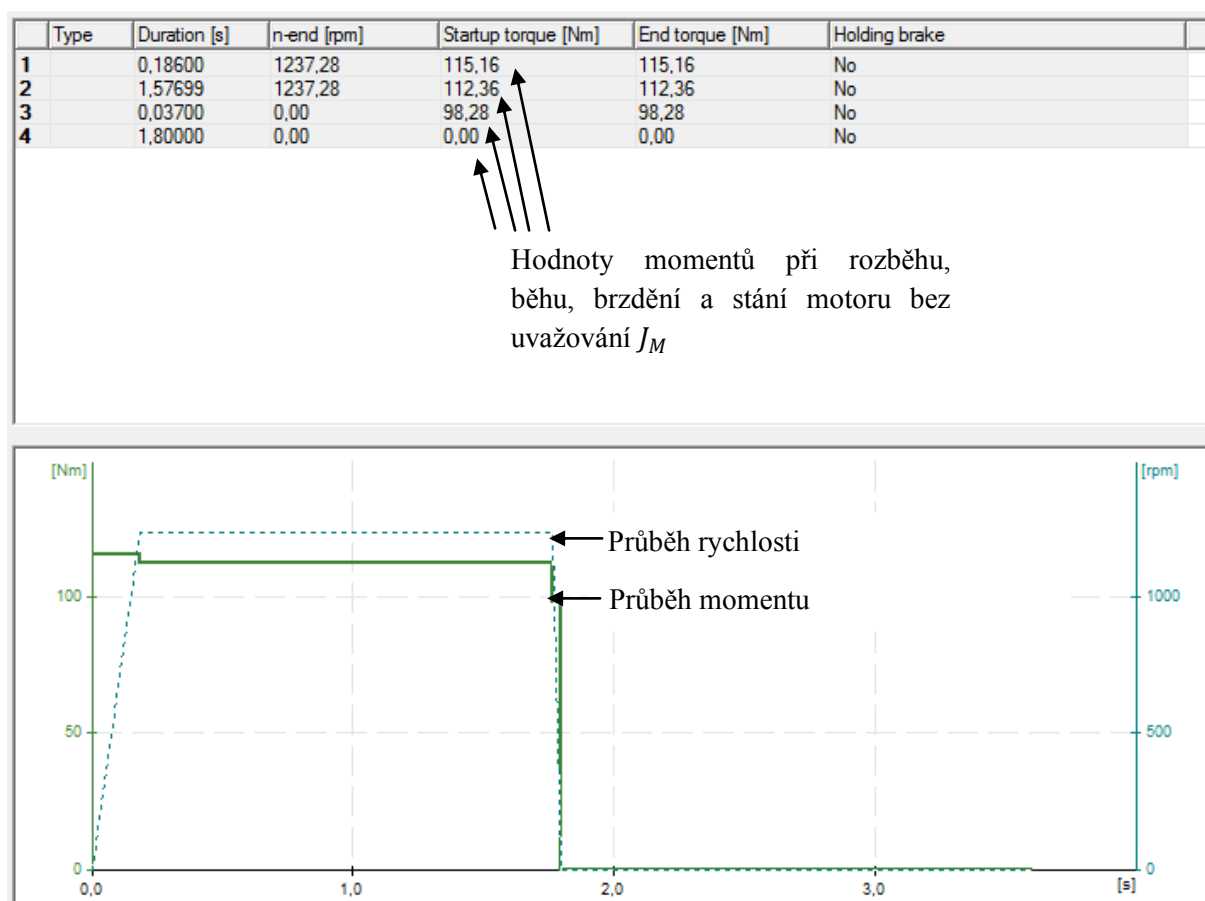
Obr. 3.17 Menu pro nastavení mechanického systému a výběr vhodného motoru



Obr. 3.18 Popis kryptovacího kola

3.9. Motor – asynchronní servomotor 1PH8

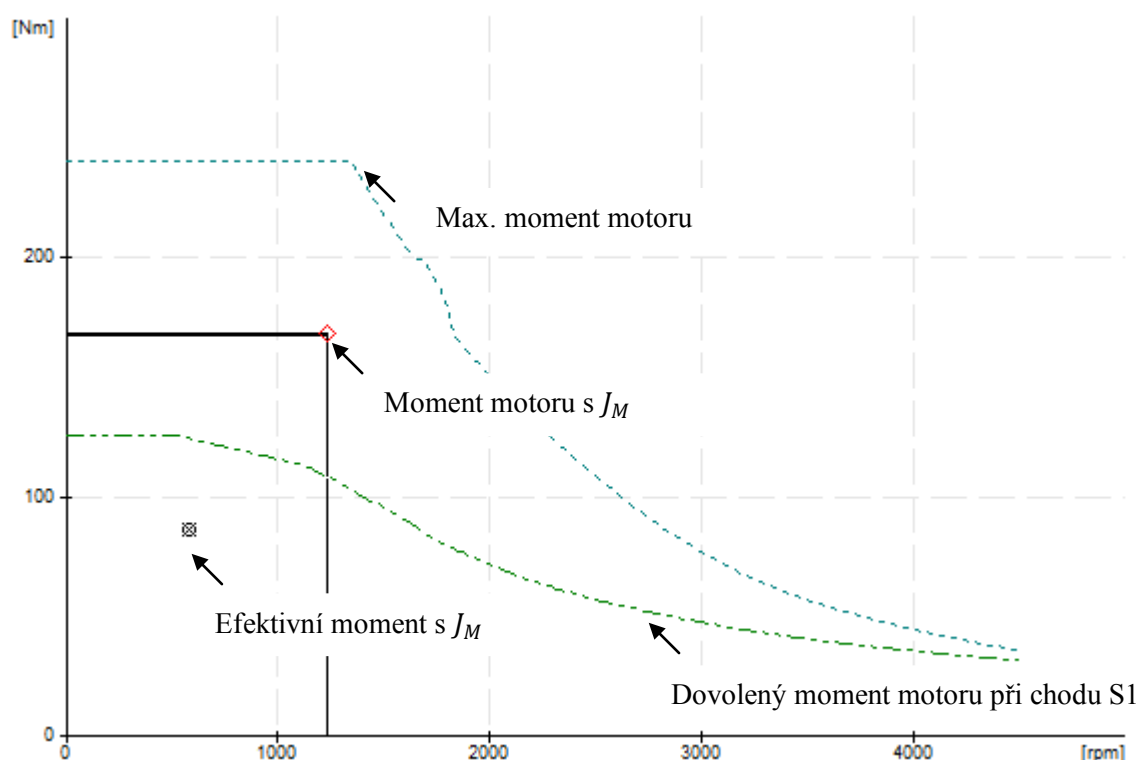
Zde si ukážeme dimenzování asynchronního servomotoru řady 1PH8 metodou efektivního momentu. Toto dimenzování provádí program Sizer. Typ motoru asynchronní, metoda chlazení nucené chlazení, typ konstrukce IM B3. Hodnoty efektivních momentů budou vypočteny pro dva způsoby, podle kterých probíhá výpočet v programu Sizer. Nejprve je proveden výpočet efektivního momentu bez uvažování momentu setrvačnosti motoru. Na základě tohoto efektivního momentu program Sizer vybere vyhovující asynchronní motor, jehož dovolený moment je větší než vypočtený efektivní moment. Tentýž výpočet provede i s uvažováním momentu setrvačnosti motoru J_M .



Obr. 3.19 Průběh momentu a rychlosti v čase

Effective torque:	79,46	Nm
Mean speed:	580,32	rpm
Peak torque:	115,16	Nm
At speed:	1237,28	rpm
Max. speed:	1237,28	rpm

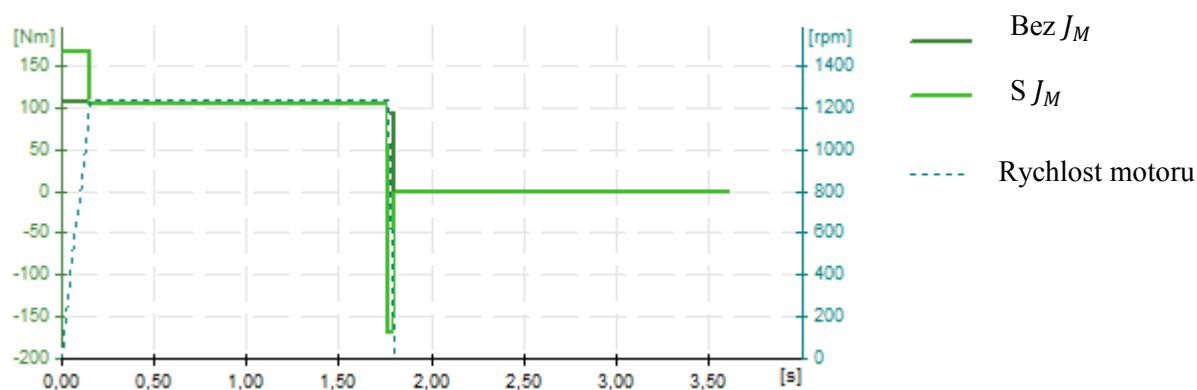
Obr. 3.20 Vypočtená hodnota efektivního momentu bez uvažování J_M pomocí programu Sizer

Zobrazení dovoleného momentu a efektivního momentu motoru 1PH8

Obr. 3.21 Dovolенý, efektivní a maximální moment motoru 1PH8133-1xFx0-xxx1 určenýSizerem

Na Obr. 3.21 můžeme vidět momentové charakteristiky motoru řady 1PH8. Maximální hodnota momentu je dána katalogovým údajem maximálního momentu motoru (viz modrá přerušovaná čára), zelený průběh je označení dovoleného momentu motoru při trvalém chodu S1. Bod efektivního momentu se nachází pod dovoleným momentem motoru, z toho plyne, že motor vyhoví požadavku $M_{EF} < M_N$. Červený bod označuje maximální využívaný moment motoru a to takový, který je potřebný především v úseku rozběhu motoru. Ten se musí nacházet pod modrou přerušovanou čarou z hlediska správného dimenzování motoru. Tyto data vycházejí z katalogových charakteristik motoru (viz. Přílohy).

Totéž je provedeno s uvažováním momentu setrvačnosti motoru J_M



Obr. 3.22 Průběh rychlosti a momentu motoru bez J_M a s J_M určeným programem Sizer

Type	Duration [s]	n-start [rpm]	n-end [rpm]	M-start [Nm] without J-motor	M-end [Nm] without J-motor	M-start [Nm] with J-motor	M-end [Nm] with J-motor	Holding brake
-	0,18600	0,00	1237,28	115,16	115,16	168,10	168,10	No
-	1,57699	1237,28	1237,28	112,36	112,36	112,36	112,36	No
-	0,03700	1237,28	0,00	98,28	98,28	-167,83	-167,83	No
-	1,80000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	No

Tab. 2 Dílčí efektivní momenty vypočtené programem Sizer

Load data		
Mean speed	580,32 rpm	
Relevant load torque at RMS current	86,68 Nm	← Efektivní moment
Load current	31,30 A	← Efektivní proud
Maximum current	59,34 A	← Maximální proud
Average electrical power	8,29 kW	

Obr. 3.23 Vypočtená hodnota efektivního momentu s uvažováním J_M pomocí programu Sizer

3.10. Střídač – motorový modul 6SL3120-1TE24-5AA3

Efektivní hodnota proudu vypočteného programem Sizer odpovídá 31,30 A a špičková hodnota proudu odpovídá 59,34 A. Dle nabídky programu Sizer je vybrán střídač s označením 6SL3120-1TE24-5AA3 s parametry doporučený proud 45 A a špičkový proud 85 A, frekvence spínání 4 kHz. V porovnání s potřebnými proudy (viz. Obr. 3.23) musí být doporučené proudy (efektivní proud a maximální proud) měniče větší. Status této jednotky je opět signalizován 2 Led diodami.

☒ Required continuous current: 31,30 A ≤ available current

☒ Required peak current: 59,34 A ≤ available peak current

Number connected in parallel:

☒ Only display selectable components

Order designation	Type	Version	Rated current	Peak current	Available current	Available peak current	Max. cable
✓ 6SL3120-1TE24-5AA3	Single	Booksize	1 * 45,00 A	85,00 A	45,00 A	85,00 A	200,00 m
✓ 6SL3120-1TE26-0AA3	Single	Booksize	1 * 60,00 A	113,00 A	60,00 A	113,00 A	200,00 m
✓ 6SL3120-1TE28-5AA3	Single	Booksize	1 * 85,00 A	141,00 A	85,00 A	141,00 A	200,00 m
✓ 6SL3120-1TE31-3AA3	Single	Booksize	1 * 132,00 A	210,00 A	132,00 A	210,00 A	200,00 m
✓ 6SL3120-1TE32-0AA4	Single	Booksize	1 * 200,00 A	282,00 A	200,00 A	282,00 A	200,00 m
✓ 6SL3320-1TE32-1AA3	Single	Chassis	1 * 210,00 A	307,00 A	172,20 A	307,00 A	300,00 m
✓ 6SL3320-1TE32-6AA3	Single	Chassis	1 * 260,00 A	375,00 A	215,80 A	375,00 A	300,00 m
✓ 6SL3320-1TE33-1AA3	Single	Chassis	1 * 310,00 A	453,00 A	272,80 A	453,00 A	300,00 m

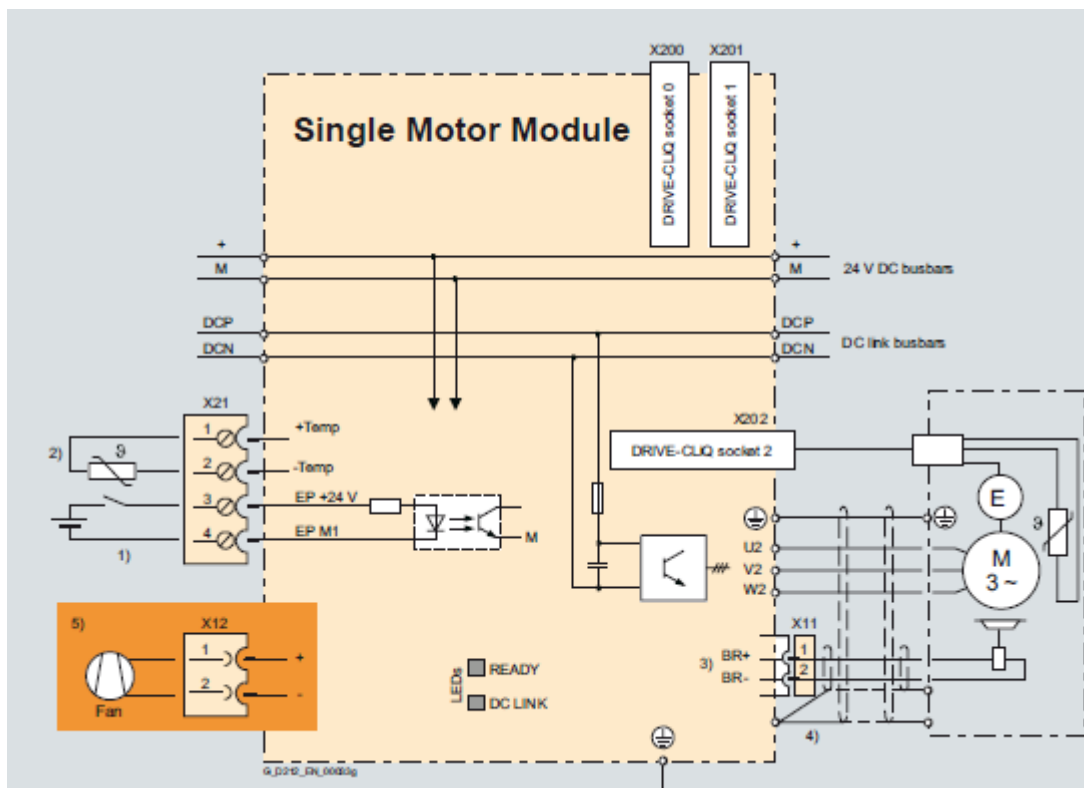
Obr. 3.24 Menu pro výběr motorového modulu



Obr. 3.25 Pohled na motorový modul - střídač

Vlastnosti:

- 2 DC linky připojitelné přes 2 DC přípojnice
- Připojka pro 1 motor
- Teplotní snímač (KTY84,130 nebo PTC)
- Bezpečnostní motorová brzda

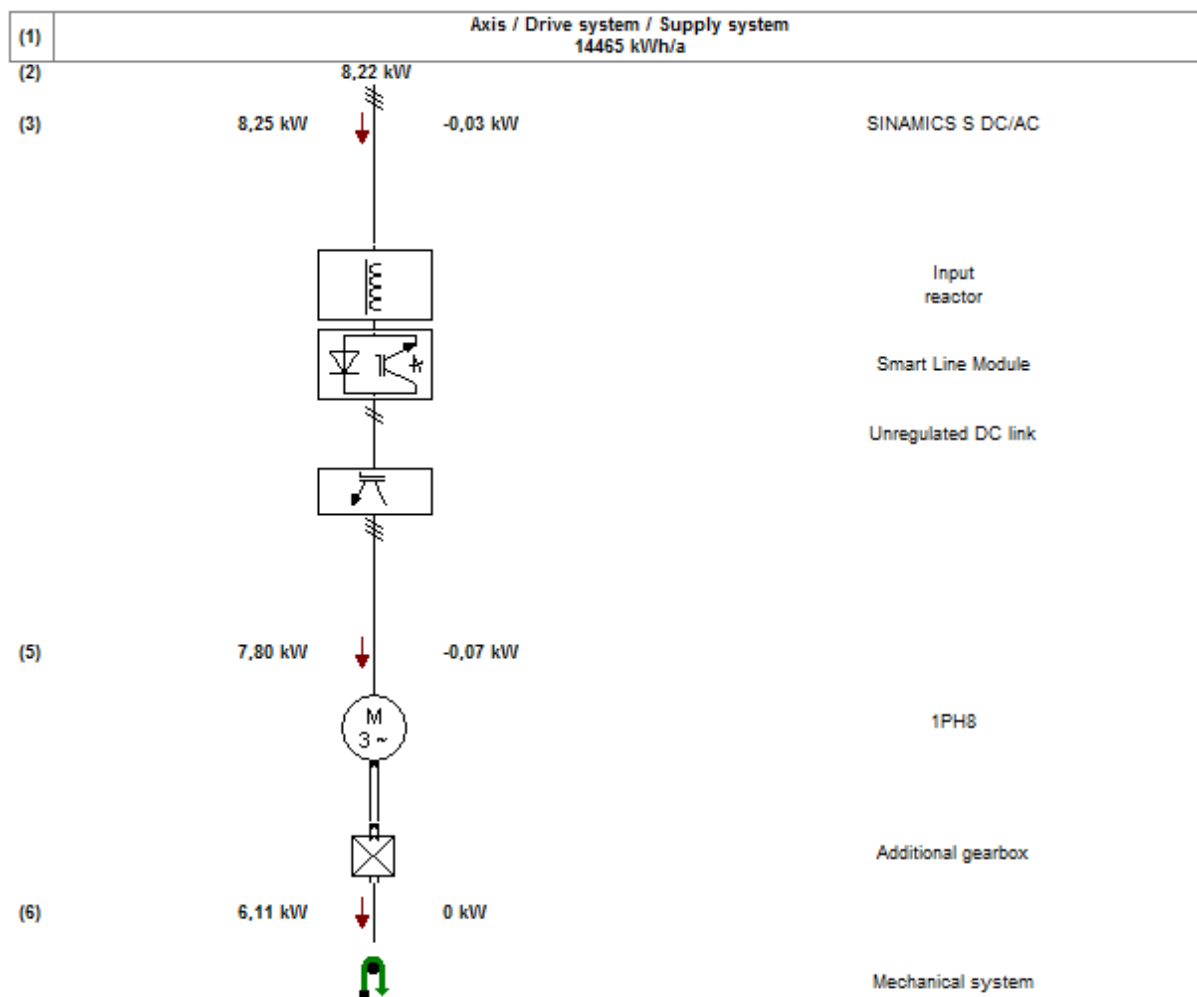


Obr. 3.26 Konfigurace motorového modulu (pro moduly od 45-200 A)

- 1) Bezpečnostní vstup
- 2) Teplotní snímač
- 3) Brzdící signál s integrovanou přepěťovou ochranou

3.11. Energetická bilance elektrického pohonu

Zde na obrázku můžeme vidět energetické požadavky pouze pro části výkonové elektroniky. Další elektronické obvody nejsou zahrnuty, obvody jako snímače, obvody s řídicí elektronikou, řadiče a 24V napájecí zdroj.



Obr. 3.27 Energetické požadavky pro jednotlivé části

1. Celková potřebná energie
2. Energie potřebná pro pohon
3. Výkon pohonu
4. Brzdící výkon
5. Výkon motoru
6. Výkon potřebný pro zátěž

3.12. Encoder – snímací zařízení

Encoder neboli snímač, je propojen s ostatními moduly přes rozhraní Drive-CLiQ. Jsou snímány signály teploty a veličiny jakož jsou napětí, proud a moment a posílány do řídicí jednotky CU320-2, kde jsou dále vyhodnocovány a zpracovány a vytvořeny kombinace spínacích pulzů. Pro všechny snímače lze použít jen jeden typ kabelu. Motory s Drive-CLiQ rozhraním zjednodušuje zkušební provoz a také diagnostiku. Identifikace typu motoru a encoderu je automatická. Princip vyhodnocení a servo řízení je zobrazeno na *Obr. 3.30*.



Obr. 3.28 Motory s rozhraním Drive-CLiQ

- synchronní motory 1PH8, 1FT7, 1FK7
- asynchronní motory 1PH8, 1PH7, 1PL6
- momentové motory 1FW3

Kabely pro encoder a signály teploty bez rozhraní Drive-CLiQ, stejně jako externí snímače musí být propojeny přes snímací moduly. Tyto moduly jsou k dispozici v krytí IP20 pro instalaci do ovládacích skříní, stejně jako snímací moduly pro externí montáž (krytí IP67). Status těchto jednotek je signalizován pomocí 2 LED diod. Vyhodnocení signálů je možné dvěma způsoby a to 1polohovým resolverem nebo vícepolohovým resolverem.

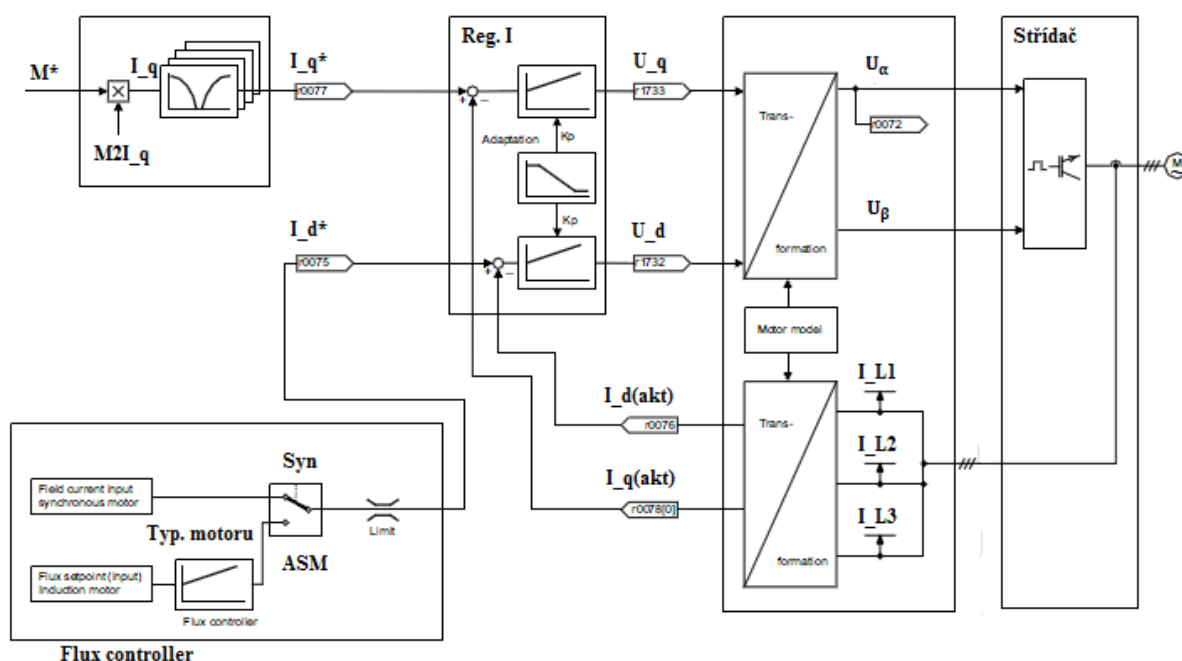


Obr. 3.29 Snímací modul SMC10

Snímací moduly mají následující připojení a rozhraní jako standard:

- rozhraní Drive-CLiQ
- připojení pro encoder včetně detekce teploty motoru (KTY84-130 nebo PTC) přes konektor SUB-D
- konektor pro napájení 24 V DC

3.13. Princip řízení střídače



Obr. 3.30 Princip Servo řízení

Měniče SINAMICS S120 umožňují 2 orientované metody řízení. Těmi jsou vektorové řízení a servo řízení. V této aplikaci bylo použito servo řízení. Na Obr. 3.30 je zobrazen princip servo řízení, který je součástí řídicí jednotky CU320-2. Jsou snímány proudy jednotlivých fází a poté přetransformovány do souřadnicového systému d, q prostřednictvím modelu motoru, který provádí transformaci a následně dochází k porovnávání s žádanými hodnotami I_d^* a I_q^* . Poté je provedena regulace proudu s ohledem na žádanou hodnotu proudu motoru pomocí regulátoru magnetizačního proudu I_d a momentotvorného proudu I_q . Výstup těchto proudových regulátorů odpovídá hodnotám napětí U_d a U_q . Poté jsou přetransformovány do souřadnicového systému α, β a následně jsou v bloku tvorby spínacích pulzů vytvářeny spínací kombinace pro spínání výkonových polovodičových prvků v měniči.

Servo řízení umožňuje tyto režimy řízení: řízení rychlosti s a bez snímače rychlosti, řízení momentu se snímačem rychlosti, řízení polohy se snímačem rychlosti. Výhody servo řízení jsou především ve vysoké dynamice a co se týká nevýhod je to zejména v nastavení přesnosti točivého momentu. Tato přesnost je nižší než u vektorového řízení. Typické aplikace servo řízení jsou jednotky s řízením s vysokou dynamikou, využívané ve výrobních strojích a průmyslových robotech. Detailní princip viz Přílohy.

3.14. Shrnutí navržených komponentů programem Sizer

Napájecí systém	
Napětí	400 V
Frekvence	50 Hz
Počet fází	3
Maximální dočasné podpětí	15 %
Podpětí	340 V

Tab. 3 Hodnoty napájecí sítě

SINAMICS S DC/AC	
DC meziobvod	Smart Line Module
Typ chlazení	Vnitřní vzduchové
Kapacita meziobvodu	2585 mF
Maximální kapacita meziobvodu	20000 mF

Tab. 4 Hodnoty DC/AC měniče

Usměrňovač – Line Module	
Výrobní označení	6SL3130-6TE23-6AA3
Název modulu	Smart Line Module

Tab. 5 Hodnoty AC/DC měniče

Podmínky prostředí	
Nadmořská výška	1000 m
Teplota okolí	40 °C

Tab. 6 Hodnoty podmínek prostředí

Usměrňovač – katalogové údaje	
Jmenovitý výkon	16 kW
Maximální výkon	36 kW
Rozměry	100 x 410 x 270 mm

Tab. 7 Katalogové údaje usměrňovače

DC meziobvod	
Vyhodnocení	Power classes
Efektivní výkon	8,73 kW
Maximální výkon	26,85 kW
Výkonový rozsah	1,8 – 8,8 kW

Tab. 8 Parametry DC meziobvodu

Střídač – motorový modul	
Výrobní označení	6SL3120-1TE24-5AA3
Název modulu	Single Motor Module
Nadmořská výška	1000 m
Teplota okolí	40 °C
Jmenovitý proud	45 A
Maximální proud	85 A
Spínací frekvence	4 kHz
Rozměry	150 x 485 x 270 mm

Tab. 9 Parametry DC/AC měniče – střídač

Napájecí kabel motoru	
Výrobní označení	6FX5008 – 1BB51 – 1BA0
Označení	DIN EN 60204-1
Rozměr	1x 4x10 mm ²
Typ kabelu	Motion Connect 500
Délka	10 m

Tab. 10 Parametry napájecího kabelu motoru

Motor	
Výrobní označení	1PH8133 – 1DF10 – 1AQ1
Nadmořská výška	1000 m
Teplota okolí	40 °C
Typ motoru	1PH8 indukční motor
Provedení motoru	Asynchronní typ
Rozhraní	Star
Metoda chlazení	Nucené chlazení (IP 55)
Verze	Standardní typ
Jmenovitý výkon	15 kW
Jmenovitý moment	96 Nm
Jmenovitý proud	34 A
Jmenovité otáčky	1500 rpm
Maximální možný moment	240 Nm
Délka hřídele	132 mm
Účinnost	0,899
Encoder	Inkrementální encoder 22 – bit
Provedení encoderu	Integrováno k motoru
Typ konstrukce	IM B3
Efektivní proud motoru	31,30 A
Maximální proud motoru	59,34 A
Efektivní moment	86,68 Nm
Maximální moment	168,10 Nm
Otáčky při maximálním momentu	1237 rpm
Maximální výstupní moment	1799,77 Nm
Maximální výstupní otáčky	76 rpm

Tab. 11 Parametry motoru

4. Kontrola navržených komponent pohonu z hlediska tepelných účinků a možnosti přetížení

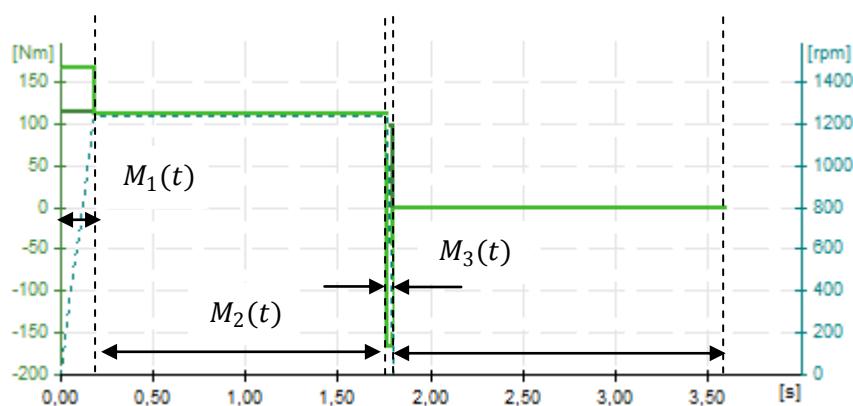
V této kapitole bude provedena kontrola dimenzování asynchronního motoru a měniče kmitočtu a to metodou efektivního momentu. Nejprve budou stanoveny dílčí efektivní momenty a vypočten celkový efektivní moment pro zadaný pracovní cyklus (viz Obr. 4.1), který je výstupem z programu Sizer. Nakonec bude provedeno porovnání těchto výpočtů na základě neznámých algoritmů, prováděných programem Sizer, s ručně vypočteným efektivním momentem dle vztahů, běžně používajících se v praxi při navrhování pohonů.

Nakonec bude provedena kontrola dimenzování měniče a výběr vhodného střídačového modulu.

	Hodnota	Jednotka
Doba cyklu t	3,6	s
Doba rozběhu t_1	0,186	s
Doba běhu t_2	1,577	s
Doba brzdění t_3	0,037	s
Doba stání t_4	1,8	s
Moment setrvačnosti J_{PM}	1,023	kgm ²
Moment setrvačnosti motoru J_M	0,075	kgm ²
Rychlost ω	129,567	rads ¹
Moment pracovního mechanismu M_{PM}	112,36	Nm
Účinník motoru $\cos \varphi$	0,85	-
Jmenovitý proud motoru I_N	34	A
Jmenovitá frekvence motoru f_N	51,3	Hz

Tab. 12 Údaje potřebné pro výpočet

4.1. Kontrola dimenzování asynchronního motoru 1PH8



Obr. 4.1 Průběh dílčích momentů vypočtených programem Sizer

Zrychlení v jednotlivých úsecích

$$\varepsilon_1 = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t_1} = \frac{129,567}{0,186} = 696,60 \text{ rads}^2 \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t_2} = 0 \text{ rads}^2 \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{d\omega}{dt} = -\frac{\Delta\omega}{\Delta t_3} = -\frac{129,567}{0,037} = -3502,82 \text{ rads}^2 \quad (4.3)$$

Dílčí momenty při rozběhu, běhu a chodu motoru bez uvažování J_M

$$M_1(t) = \frac{d\omega}{dt_1} \cdot J_{PM} + M_{PM}(t) = \frac{129,567}{0,186} \cdot 0,00386 + 112,36 = 115,05 \text{ Nm} \quad (4.4)$$

$$M_2(t) = \frac{d\omega}{dt_2} \cdot J_{PM} + M_{PM}(t) = 0 \cdot 0,00386 + 112,36 = 112,36 \text{ Nm} \quad (4.5)$$

$$M_3(t) = -\frac{d\omega}{dt_3} \cdot J_{PM} + M_{PM}(t) = -\frac{129,567}{0,037} \cdot 0,00386 + 112,36 = 98,84 \text{ Nm} \quad (4.6)$$

Výsledný efektivní moment

$$M_{EF} = \sqrt{\frac{1}{t_1 + t_2 + t_3 + \beta_0 t_4} \cdot (M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3)} \quad (4.7)$$

Kde:

t_1, t_2, t_3, t_4 - jednotlivé časové úseky [s]

M_1, M_2, M_3 - dílčí momenty v jednotlivých časových úsecích

β_0 - činitel zhoršeného ochlazování (charakteristiky motoru viz *Přílohy*)

$$M_{EF} = \sqrt{\frac{1}{0,186 + 1,577 + 0,037 + 1 \cdot 1,8} \cdot (115,05^2 \cdot 0,186 + 112,36^2 \cdot 1,577 + 98,84^2 \cdot 0,037)}$$

$$M_{EF} = 79,46 \text{ Nm} \quad (4.8)$$

Zde můžeme vidět, že při porovnání efektivního momentu vypočteného programem Sizer (2. Bod zadání) $M_{EFS} = 79,46 \text{ Nm}$ a efektivním momentem vypočteným ručně $M_{EF} = 79,46$, jsou tyto momenty totožné.

Dílčí momenty při rozběhu, běhu a chodu motoru s uvažováním J_M

$$M_1(t) = \frac{d\omega}{dt_1} \cdot (J_{PM} + J_M) + M_{PM}(t) = \frac{129,567}{0,186} \cdot (0,00386 + 0,075) + 112,36 = 168 \text{ Nm} \quad (4.9)$$

$$M_2(t) = \frac{d\omega}{dt_2} \cdot (J_{PM} + J_M) + M_{PM}(t) = 0 \cdot (0,00386 + 0,075) + 112,36 = 112,36 \text{ Nm} \quad (4.10)$$

$$M_3(t) = -\frac{d\omega}{dt_3} \cdot (J_{PM} + J_M) + M_{PM}(t) = -\frac{129,567}{0,037} \cdot (0,00386 + 0,075) + 112,36 = -167,28 \text{ Nm} \quad (4.11)$$

Výsledný efektivní moment

$$M_{EF} = \sqrt{\frac{1}{t_1 + t_2 + t_3 + \beta_0 t_4} \cdot (M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3)}$$

Kde:

t_1, t_2, t_3, t_4 - jednotlivé časové úseky [s]

M_1, M_2, M_3 - dílčí momenty v jednotlivých časových úsecích [Nm]

β_0 - činitel zhoršeného ochlazování $\beta_0 = 1$ (β_0 vyplývá z charakteristik motoru, viz Přílohy)

$$M_{EF} = \sqrt{\frac{1}{0,186 + 1,577 + 0,037 + 1 \cdot 1,8} \cdot (168^2 \cdot 0,186 + 112,36^2 \cdot 1,577 + 167,28^2 \cdot 0,037)}$$

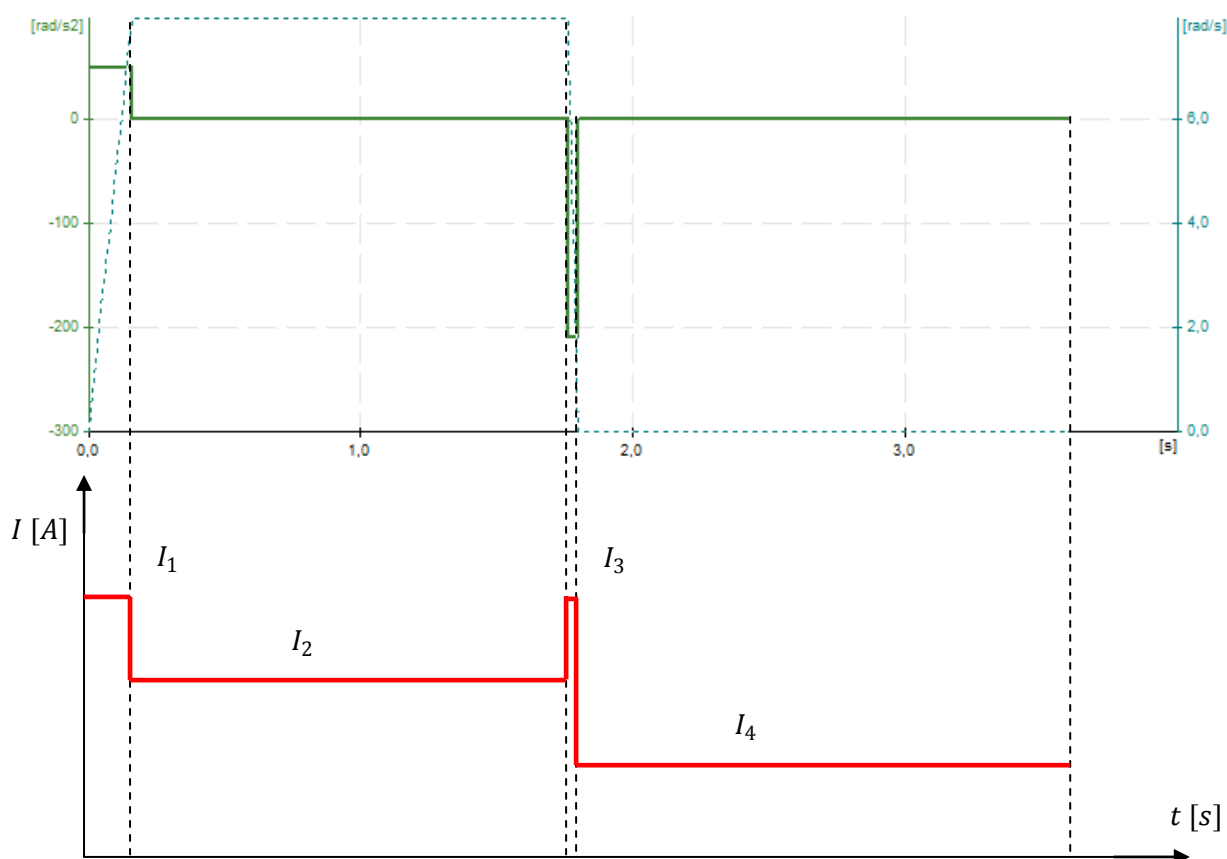
$$M_{EF} = 85,3 \text{ Nm} \quad (4.12)$$

Zde můžeme vidět, že při porovnání efektivního momentu vypočteného programem Sizer $M_{EFS} = 86,68 \text{ Nm}$ a efektivním momentem vypočteným ručně $M_{EF} = 85,3$, se mírně liší. Avšak tato chyba je zanedbatelná, neboť i tak je splněna podmínka dimenzování motoru. $M_N = 96 \text{ Nm}$.

$$M_{EF} < M_N \quad (4.13)$$

4.2. Kontrola dimenzování měniče kmitočtu (část střídač)

Zde je provedeno dimenzování měniče kmitočtu (část střídač). Je vycházeno z pracovního cyklu (horní obrázek), pro který v jednotlivých úsecích budou vypočteny jednotlivé proudy a jednotlivé úseky vyneseny v grafu (spodní obrázek). Vzhledem tomu, že se jedná o vícemotorový systém a jsou do společného meziobvodu zapojeny ještě střídač pro skládačku a odvíječku, bylo by třeba brát v úvahu i tyto mechanismy. Ale jelikož činnost těchto strojů nezasahuje do pracovního cyklu kryptovacího stroje, postačí provést dimenzování měniče kmitočtu pouze pro kryptovací stroj, neboť zbylé mechanismy jsou daleko nižšího výkonu.



Obr. 4.2 Průběh proudu měniče kmitočtu v dílčích úsecích (rozběh, běh, brzdění a pauza)

$$I_4 = I_{DN} = I_N \cdot \sin \varphi = 34 \cdot 0,527 = 17,918 \text{ A} \quad (4.14)$$

$$I_{QN} = I_N \cdot \cos \varphi = 34 \cdot 0,85 = 28,9 \text{ A} \quad (4.15)$$

$$I_2 = \sqrt{I_{DN}^2 + I_{QN}^2 \left(\frac{M}{M_N}\right)^2} = \sqrt{17,918^2 + 28,9^2 \left(\frac{112,36}{96}\right)^2} = 38,28 \text{ A} \quad (4.16)$$

$$I_1 = I_3 = \sqrt{I_{DN}^2 + I_{QN}^2 \left(\frac{M}{M_N}\right)^2} = \sqrt{17,918^2 + 28,9^2 \left(\frac{0,7 \cdot 240}{96}\right)^2} = 53,655 \text{ A} \quad (4.17)$$

Nyní si stanovíme střední a efektivní hodnotu proudu

$$I_{FAV} = \frac{I_1 \cdot t_1 + I_2 \cdot t_2 + I_3 \cdot t_3 + I_4 \cdot t_4}{t} \quad (4.18)$$

$$I_{FAV} = \frac{53,655 \cdot 0,186 + 38,28 \cdot 1,577 + 53,655 \cdot 0,037 + 17,918 \cdot 1,8}{3,6} = 29,05 \text{ A} \quad (4.19)$$

$$I_{EF} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3 + I_4^2 \cdot t_4}{t}} \quad (4.20)$$

$$I_{EF} = \sqrt{\frac{53,655^2 \cdot 0,186 + 38,28^2 \cdot 1,577 + 53,655^2 \cdot 0,037 + 17,918^2 \cdot 1,8}{3,6}} = 31,32 \text{ A} \quad (4.21)$$

Při porovnání s doporučenou hodnotou proudu vypočteného programem Sizer, kde tento proud dosahoval hodnoty $I_{EFS} = 31,30 \text{ A}$, tak s ručně vypočtenou hodnotou tento proud dosáhl hodnoty $I_{EF} = 31,32 \text{ A}$. Tudíž výsledný typ střídače odpovídá střídači vybraným programem Sizer pro danou aplikaci s označením 6SL3120-1TE24-5AA3.

5. Závěr

Hlavní úkolem této diplomové práce bylo provést návrh elektrického pohonu pro kryptovací stroj, prostřednictvím návrhového nástroje Sizer firmy Siemens. Při návrhu jsem vycházel ze základních technologických požadavků, kladených na elektrický pohon. Mezi tyto požadavky patří vypočítaný potřebný výkon a z něj moment pracovního mechanismu (viz kapitola 2.6.), doby rozběhu, běhu, brzdění a pauzy v daném pracovním cyklu (viz kapitola 2.8.). Na Obr. 3.1 je výsledná koncepce elektrického pohonu skládajícího se ze síťových tlumivek, měniče Sinamics S120, který je složen z IGBT tranzistorového usměrňovače se spínáním tranzistorů synchronizovaných se síťovým kmitočtem, stejnosměrného meziobvodu, a střídačových modulů pro jednotlivé stroje, asynchronního motoru 1PH8, převodovky s převodovým ústrojím $i = 16,28$, řídicí jednotky CU320 a kryptovacího stroje. Tyto komponenty byly vybrány návrhovým nástrojem Sizer firmy Siemens.

Byly porovnány a ověřeny shodnosti dimenzování asynchronního motoru prostřednictvím návrhového nástroje Sizer bez známého algoritmu dimenzování a výběru vhodných komponent (viz kapitola 3.4.–3.10.) se vztahy pro dimenzování motorů, používaných běžně v praxi (viz kapitola 4.1. a 4.2.). Pro dimenzování motoru byla využita metoda efektivního momentu. Kapitola 3.13. obsahuje shrnutí použitých komponentů navržených návrhovým nástrojem Sizer.

6. Literatura

- [1] KŮS, V. *Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2002. 183 s. ISBN 80-7300-062-8 (váz.).
- [2] ČAHA, Z. – ČERNÝ, M. *Elektrické pohony*. 1. vyd. Ostrava: 1990. 359 s. ISBN 80-03-00418-7 (váz.).
- [3] TIMKO, J. – FEDÁK, V. *Elektrické pohony*. 1. vyd. Košice: Rektorát vysoké školy technické, 1988. 355 s.
- [4] SEBORSKÝ, S. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989. 298 s.
- [5] BŘEZINA, R. – PETRUŽÁLEK, J. *Úvod do tváření II*. Ostrava: VŠB-TUO, 2002. 114 s. ISBN -80-248-0068-3 (brož.).
- [6] PROCHÁZKA, J. – ZAPOTIL, M. – NĚMEC, M. – NOVOTNÝ, J. *Technologie slévání, tváření a svařování*. 1. vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1982. 343 s.
- [7] *Skripta Technologie II - Technologie tváření kovů*.
URL: < http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm > [cit. 2012-11-21].
- [8] *Akademie tváření: Ohýbání*.
URL:
<http://www.mmspektrum.com/content/100716_Akademie_tva%C5%99eni_oh%C3%BDb%C3%A1n%C3%AD%281%29.pdf> [cit. 2012-11-21].
- [9] *Simotion, Sinamics SI20 and Motors for production machines*.
URL: < http://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/motion-control-systems-and-solutions/Documents/Catalog_PM21-SIMOTION_SINAMICS_Motors_Prod_Machines.pdf > [cit. 2013-01-05].
- [10] *Main Motors for SINAMICS SI20 - Configuration Manual*.
URL: < http://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-motor/mc-motors/servo-motors/1ph8-servo-motors/Documents/MTR-MAN-1PH8_Induction_Servo_SH80-280-Configuration_Manual.pdf > [cit. 2013-01-08].
- [11] *Přehledový prospekt produktové skupiny Sinamics*.
URL:
<http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/technika_pohonu/menice/_prospekty/brochure_sinamics_drives_2011_cz.pdf> [cit. 2013-03-13].
- [12] *SINAMICS - Low Voltage Projektierungshandbuch*.
URL:
<http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/technika_pohonu/menice/stridave_menice/nizko_napetove_menice/manualy/enman_sinamics-v6-0_2010-07_de.pdf> [cit. 2013-03-13].

7. Seznam příloh

Příloha 1. Momentové charakteristiky motoru

Příloha 2. Detailní výkresy servo řízení

Příloha 3. Fotky realizovaného pohonu